



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

CHLAZENÍ PRŮMYSLOVÉ HALY

INDUSTRIAL HALL COOLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Sliva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav technických zařízení budov

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Matěj Sliva
Název	Chlazení průmyslové haly
Vedoucí práce	doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Stavební dokumentace zadané budovy
2. Aktuální legislativa ČR
3. České i zahraniční technické normy
4. Odborná literatura
5. Zdroje na internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je zmapovat problematický stávající stav tepelně-vlhkostního klimatu konkrétní práškové lakovny a navrhnout strojní způsob jeho úpravy.

- práce bude zpracována v souladu s platnými předpisy (zákony, vyhláškami, normami) pro navrhování zařízení techniky staveb

- obsah a uspořádání práce dle směrnice FAST:

- a) titulní list,
- b) zadání VŠKP,
- c) abstrakt v českém a anglickém jazyce, klíčová slova v českém a anglickém jazyce,
- d) bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690,
- e) prohlášení autora o původnosti práce, podpis autora,
- f) poděkování (nepovinné),
- g) obsah,
- h) úvod,
- i) vlastní text práce s touto osnovou:
 - A. Teoretická část – literární rešerše ze zadaného tématu
 - B. Výpočtová část
analýza objektu – energetická zařízení zpracovaná v tématech:
tepelné bilance,
průtoky, tlakové poměry
distribuce, dimenzování.
 - C. Projekt – úroveň prováděcího projektu: výkresy dvoučarově, půdorysy + řezy (řešené místnosti, strojovna), 1:50 (1:100) – budou uloženy samostatně jako přílohy, technická zpráva (tabulka místností, tabulka zařízení), technická specifikace
- j) závěr,
- k) seznam použitých zdrojů,
- l) seznam použitých zkratk a symbolů,
- m) seznam příloh,
- n) přílohy - výkresy

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problémem vysoké tepelné zátěže na pracovníky výrobní linky práškové lakovny, jedná se zejména o letní provoz. Majoritním zdrojem tepla je zde radiace z povrchů linky a lakovaných dílců s výrazně vyšší teplotou povrchu. Cílem je najít optimální opatření pro snížení tepelné zátěže na pracovníky. Toto je řešeno pomocí CFD simulací v programu Designbuilder. První simulace popisuje stávající stav v kritickém letním období, další varianty pak navržené způsoby chlazení ofukováním lidí či výrobků pro zvýšení konvektivního přenosu tepla, adiabatické chlazení přívodního vzduchu nebo výrobků. Každá simulace pracuje s jinými způsoby chlazení či jejich kombinacemi. Podmínky pracovního prostředí v jednotlivých simulacích jsou posouzeny dle ukazatele WBGT pro horké provozy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Prášková lakovna, tepelná zátěž, WBGT (teplota mokrého a kulového teploměru), CFD (Výpočet dynamických toků) simulace

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of working conditions in heat in the workplace of the powder coating plant production line, especially summer operation. The largest heat source here is from the surface. The aim is to optimize measures to reduce heat stress for workers. This is solved by CFD simulations in Designbuilder. It is expected that this will be the first way in which it will evolve in the future. Each simulation focuses on alternative cooling methods or combinations thereof. The work environment requirements for each simulation are evaluated by the WBGT indicator for hot operations.

KEYWORDS

Powder varnish, heat stress, WBGT (wet bulb globe temperature), CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Matěj Sliva *Chlazení průmyslové haly*. Brno, 2019. 94 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Chlazení průmyslové haly* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 5. 2019

Matěj Sliva
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto velice poděkoval mému vedoucímu doc. Ing. Ondřeji Šikulovi, Ph.D. za jeho pomoc, ochotu a odborné rady, kterými mě vedl při konzultacích v průběhu řešení této práce.

OBSAH

OBSAH.....	9
ÚVOD.....	12
A. TEORETICKÁ ČÁST	13
A.1 Norma popisující WBGT (teplota mokrého a kulového teploměru)	14
A.1.1 Představení	14
A.1.2 Možnosti aplikace	14
A.1.3 Reference	14
A.1.4 Termíny a definice	14
A.1.4.1 WBGT teplota mokrého a kulového teploměru	14
A.1.4.2 WBGT _{eff} efektivní teplota mokrého a kulového teploměru	15
A.1.4.3 CAV (clothing adjustment value) upravující součinitel oblečením	15
A.1.5 Metoda	15
A.1.6 WBGT	16
A.1.7 Metabolické produkce.....	16
A.1.8 Efektu oblékání	17
A.1.9 Načasování a průběh měření	17
A.1.9.1 Načasování měření	17
A.1.9.2 Průběh měření	17
A.1.10 Prostorová a časová modifikace	18
A.1.10.1 Prostorová modifikace.....	18
A.1.10.2 Časová modifikace	18
A.1.11 Vyhodnocení	19
A.1.12 Příloha A referenční hodnoty indexu tepelné zátěže WBGT.....	20
A.1.13 Příloha B – Měření parametrů použitých v indexu WBGT a specifikace měřicích přístrojů	22
A.1.13.1 Příloha B.1 Senzor teploty přirozeně mokrého teploměru	22
A.1.13.2 Příloha B.2 Senzor teploty kulového teploměru	23
A.1.13.3 Příloha B.3 Měření teploty vzduchu	23
A.1.14 Příloha C – Alternativní kulové teploměry	24
A.1.15 Příloha D – Předvídaná teplota přirozeně mokrého teploměru	26
A.1.16 Příloha E – Stanovení metabolické produkce.....	28
A.1.17 Příloha F – Koeficient upravující vliv oblečení (CAV)	29
B. Výpočtová část	30
B.1 Popis objektu.....	31
B.2 Popis výrobní technologie	31

B.3	Výpočetní model	32
B.3.1	Měření teplot a rychlostí proudění vzduchu	34
B.3.1.1	Použité měřicí přístroje	34
B.3.1.2	Způsob měření	35
B.3.1.3	Měřená místa a hodnoty	37
B.3.2	Tvorba 3D modelu	40
B.4	Výpočet chladnutí výrobků.....	42
B.5	Simulace	47
B.5.1	Simulace 1 – stávající stav s naměřenými průtoky vzduchu.....	48
B.5.2	Simulace 2 – stávající stav s průtoky vzduchu dle specifikací ventilátorů	51
B.5.3	Simulace – 3 konvektivní chlazení výrobků	54
B.5.4	Simulace – 4 adiabatické a konvektivní chlazení výrobků	57
B.5.5	Simulace – 5 konvektivní chlazení pracovníků	61
B.5.6	Simulace – 6 konvektivní chlazení výrobků a pracovníků	64
B.5.7	Simulace – 7 konvektivní chlazení výrobků a pracovníků + adiabatické chlazení výrobků	67
B.5.8	Výsledky ze simulací.	70
B.6	Výpočet vlhkostních poměrů	72
B.6.1	Celková vnitřní produkce vlhkosti.....	72
B.6.2	Měrná vlhkost interiéru v simulacích 2, 3, 4	72
B.6.3	Měrná vlhkost interiéru v simulaci 5	72
B.6.4	Měrná vlhkost interiéru v simulacích 6, 7	73
B.7	Výpočet WBGT	73
B.8	Vyhodnocení simulací.....	75
B.9	Navrhované opatření.....	76
B.9.1	Dimenzování VZT potrubí.....	78
B.9.1.1	Tlakové ztráty při proudění vzduchu.....	78
B.9.1.2	Návrh ventilátorů	81
B.9.1.1	Návrh adiabatického chladiče	84
C.	projekt.....	85
C.1	Tabulky	86
C.1.1	Technická specifikace	86
C.1.2	Použité normy a vyhlášky	88
	ZÁVĚR	89
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	90
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	91

SEZNAM OBRÁZKŮ	92
SEZNAM PŘÍLOH	94

ÚVOD

Cílem mé bakalářské práce je nalezení a navrhnutí optimálního opatření pro snížení tepelné zátěže na pracovníky v práškové lakovně. Prioritním zájmem investora je zlepšení pracovního prostředí v zóně s nejvyšší koncentrací pracovníků.

První teoretická část se věnuje tématu hodnocení prostředí horkých provozů pomocí ukazatele WBGT (wet bulb globe temperature). Popisuje stanovení požadované teploty dle WBGT na pracovišti a určení hodnoty pro konkrétní případ. Dále pak podmínky a předpoklady pro měření veličin potřebných ke stanovení WBGT teploty.

Ve výpočtové části je jako první nastíněna technologie výroby práškové lakovny. Dalším krokem je vytvoření výpočetního modelu linky pro CFD simulace v programu Designbuilder. Pro vytvoření modelu byla provedena různá měření, a to nasnímání povrchů výrobní linky a výrobků thermokamerou, měření teploty a rychlosti proudění vzduchu v prostoru a střední radiační teploty kulovým teploměrem. Byly provedeny výpočty chladnutí lakovaných výrobků v čase v závislosti na rychlosti proudění vzduchu nebo adiabatickém chlazení. Dále jsou popsány jednotlivé simulované stavy, jejich předpoklady a okrajové podmínky. Výsledky ze simulací tří reprezentativních bodů jsou shrnuty v dílčích tabulkách a demonstrovány graficky pro celou halu na rovinných řezech výpočetního modelu. Jsou vypočteny tepelně vlhkostní bilance pracovního prostředí na základě výsledků simulací a poskytnutých informací investorem. Následuje výpočet indexu WBGT, požadovaný stav a stavy jednotlivých simulací. Na konci se porovnávají jednotlivé simulace a pomocí WBGT se hodnotí nové navržené prostředí, zvolí se optimální opatření s ohledem na snížení teplotního stresu, náročnost provedení, provozu a finanční stránku.

V projektové části je zpracována technická zpráva a nezbytné výkresy pro realizaci projektu.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

A. TEORETICKÁ ČÁST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Sliva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2019

A.1 Norma popisující WBGT (teplota mokrého a kulového teploměru)

ČSN EN ISO 7243 z roku 2018. Tato norma obsahuje standardy k hodnocení horkých, středních a studených prostředí. Nahrazuje předchozí normu ČSN ISO 7243 z roku 1993.

A.1.1 Představení

Teplota mokrého a kulového teploměru (WBGT) je indexem tepelné zátěže a jeho hodnota představuje teplotní prostředí, kterému jsou lidé vystaveni. Je to mapovací metoda, která stanoví, zda se ve vyšetřovaném místě tepelná zátěž vyskytuje či nikoliv. Tato metoda je odhadem tepelné zátěže, založeném na analýze výměny tepla mezi osobou a prostředím, kterému je jednotlivec vystaven.

A.1.2 Možnosti aplikace

Norma umožňuje hodnotit účinek tepla na osobu, kterému je vystavena během jejího pracovního dne (do 8 hodin). Nehodnotí velmi krátká vystavení tepla. Posuzuje vnitřní a venkovní pracovní prostředí stejně tak, jako ostatní typy prostředí pro muže a ženy schopné práce.

A.1.3 Reference

ISO 7933, *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*

ISO 13731, *Ergonomics of the thermal environment – Vocabulary and symbols*

A.1.4 Termíny a definice

A.1.4.1 WBGT teplota mokrého a kulového teploměru

Jednoduchý index prostředí pracujících s metabolickou produkcí lidí vystavených horkým podmínkám k určení tepelné zátěže. Kombinuje dva různé parametry: mokrou teplotu vzduchu přirozeně proudícím přes čidlo (t_{nw}) a teplotu kulového teploměru (t_g) zahrnující vliv teploty vzduchu a teploty okolních ploch, redukovanou teplotou vzduchu (t_a) s vlivem proudění vzduchu.

A.1.4.2 WBGT_{eff} efektivní teplota mokrého a kulového teploměru

WBGT hodnota upravena účinky oblečení. WBGT uvažuje standartní pracovní oděv (index tepelné izolace $I_{cl} = 0,6 \text{ clo}$, $i_m = 0,38$). Popsáno v normě ISO 9920.

A.1.4.3 CAV (clothing adjustment value) upravující součinitel oblečením

Upravuje hodnotu WBGT účinkem oblečení, které má jiné vlastnosti, než standartní pracovní oděv – bavlněné triko s dlouhými rukávy a bavlněné kalhoty.

A.1.5 Metoda

Stupeň tepelné zátěže, které je osoba vystavena, závisí na:

- a) charakteristikách prostředí ovlivňující přenos tepla mezi tělem a okolím
- b) produkci tepla uvnitř těla jako výsledek fyzické aktivity
- c) nošeném oblečení, které mění výměnu tepla s prostředím

Detailní analýza vlivu prostředí z hlediska tepelné zátěže požaduje znalost následujících základních parametrů: teplotu vzduchu, střední radiační teplotu, rychlost proudění vzduchu a absolutní vlhkost. Pro první přiblížení tepelné zátěže lze použít tabelovaných hodnot (Tab 5).

Vnitřní tepelná zátěž je výsledkem metabolické energie způsobené aktivitou. Výše produkce metabolického tepla je obvykle odhadnuta. (Tab 6).

Práh tepelné zátěže uvažuje se standartním pracovním oděvem – bavlněné triko s dlouhými rukávy a bavlněné kalhoty. Pro ostatní oblečení se upravuje (Tab 7).

Tato metoda počítá s vlivy: změny polohy, délkou trvání, aktivit, stejně tak jako s proměnlivostí v čase (Tab 8).

WBGT referenční hodnota uvažuje se stálým vystavením podmínkám do 8 hodin. WBGT hodnoty získané touto metodou jsou porovnány s limitními hodnotami. Pokud jsou hodnoty větší, než referenční, zvyšuje se pravděpodobnost výskytu poruch spojených s teplem a je nutno bud':

- přímo snížit tepelnou zátěž nebo fyzické vypětí na pracovišti vhodnými metodami, nebo
- provést detailní analýzu tepelné zátěže podle ISO 7933.

Hraniční limity popisované v dokumentu jsou navrženy k redukci možnosti onemocnění spojené s teplem a nevylučuje možnost ostatních následků spojených s vystavením tepelné zátěži (možnost popálení, snížení produktivity nebo nedostatek komfortu).

A.1.6 WBGT

Rovnice [1] a [2] pro výpočet WBGT ukazuje vztah mezi jednotlivými parametry:

- bez slunečního záření

$$\text{WBGT} = 0,7t_{\text{nw}} + 0,3t_{\text{g}} \quad [1]$$

- se slunečním zářením

$$\text{WBGT} = 0,7t_{\text{nw}} + 0,2t_{\text{g}} + 0,1t_{\text{a}} \quad [2]$$

Kulová teplota stanoví celkové tepelné zisky radiací ze slunce a ostatních zdrojů. Vzorec [2] počítá s přeceněním přímého radičního tepla ze slunce. Referenční hodnoty byly vybrány tak, že může být dosahováno hraniční úrovně tepelného stresu nepřetržitě během celého pracovního dne (do 8hodin). Časový interval reprezentativního vystavení tepelné zátěži pro analýzu je kolem 1 hodiny. Pokud se kvalita prostředí v čase či prostoru mění, je třeba tyto varianty upravit.

A.1.7 Metabolické produkce

Množství tepla produkovaného uvnitř těla významně přispívá k tepelné zátěži, je platným odhadem nezbytným k posouzení. Metabolická produkce reprezentující celkové množství energie spotřebované uvnitř těla za čas, je dobrým odhadem pro většinu situací. Metabolická produkce může být stanovena jako: nízká, střední, vysoká nebo velmi vysoká. Hodnoty, uvažovány jako nepřetržitá práce popsaného úsilí, jsou popsány v Tab E.1.

A.1.8 Efektu oblékání

Referenční hodnoty limitů vystavení tepelné zátěži v příloze A byly stanoveny pro bavlněné pracovní oblečení ($I_{cl} = 0,6 \text{ clo}$, $i_{m} = 0,38$). Jiné druhy oblečení, obzvláště s jinou difuzí propustností, mají rozdílné účinky na tepelnou zátěž, pro ta jsou pak stanoveny hodnoty (CAV) ve WBGT teplotních jednotkách, o které se WBGT navýší.

$$WBGT_{\text{eff}} = WBGT + CAV$$

Příloha F poskytuje tabulku s hodnotami CAV. Účinek oblečení je komplexní a CAV je jednoduchou aproximací, která bere v úvahu tepelnou zátěž na osobu za pomoci laboratorních výsledků. Pokud druh oblečení není v tabulce, použije se hodnota s nejpodobnějšími vlastnostmi. Jestliže však neexistuje ani podobný druh oblečení, nelze tento dokument použít a měla by se provést detailnější analýza dle ISO 7933. CAV je jednoduchou aproximací účinku nošení jiného oblečení, než „standartní pracovní oblečení“, pro které je hodnota CAV rovna 0. Obecně, CAV narůstá s klesající difuzní propustností. Ostatní účinky jsou radiační teplo, rychlost proudění vzduchu, pohyby těl a vlhkost. Nejvíce CAV ovlivní kombinace vysokého difuzního odporu a vlhkosti. V tomto případě se kvůli bezpečnosti součinitel velmi navýší. Účinky radiační složky tepla na CAV není znám.

A.1.9 Načasování a průběh měření

A.1.9.1 Načasování měření

WBGT umožňuje pouze odhad tepelné zátěže, které je pracovník vystaven během měření. Tudíž by se měření měla provádět během horkých letních období, kdy je tepelná zátěž největší. Ze stejného důvodu by se mělo měřit v poledne nebo v době s největší tepelnou zátěží. Jestliže je práce během dne rozdělena do zřetelně odlišných typů či kategorií, měla by se měření analogicky separovat, stejně jako jejich vyhodnocení.

A.1.9.2 Průběh měření

Měření WBGT se provádí během reprezentativního údobí po dobu okolo 1 hodiny. Délka každého měření je závislá na době odezvy senzorů, která může být v jistých případech značná (u teploty kulového teploměru obzvláště). Odečítání měřených hodnot je možno, až po ustálení sledovaných hodnot. Proto by měla být celková doba odečítání hodnot delší než sledované reprezentativní údobí pro analýzu. Měření lze zaznamenávat

ve vysoké frekvenci (každou minutu či vteřinu) a nahromadit tak velké množství dat v digitální formě.

Je třeba počítat s ovlivňujícími faktory měření, jako je přesnost, časová konstanta, a citlivost senzorů

A.1.10 Prostorová a časová modifikace

A.1.10.1 Prostorová modifikace

WBGT hodnoty se obvykle měří v úrovni břicha lidí, kteří jsou vystaveni teple. Pokud je vyšetřované prostředí nehomogenní, měří se v místě s největší tepelnou zátěží. V případě, kdy není možno umístit senzor do pracovní zóny, je instalován do prostředí se stejnými parametry.

A.1.10.2 Časová modifikace

Pokud se ukáže, že měřené hodnoty prostředí, sledované pracovní činnosti nebo nošené oblečení nejsou v čase konstantní, je třeba stanovit střední reprezentativní hodnotu. Nejpřesnějším způsobem je měření vývoje parametrů v čase. Reprezentativní hodnotu získáme rovnicí:

$$\bar{p} = \frac{(p_1 \times t_1) + (p_2 \times t_2) + \dots + (p_n \times t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Kde p_1, p_2, \dots, p_n jsou sledované hodnoty získané během měření během časových intervalů t_1, t_2, \dots, t_n .

Počet měření závisí na míře proměnlivosti parametrů v čase, časové odezvě použitých senzorů a navržené přesnosti měření.

A.1.11 Vyhodnocení

Hodnoty $WBGT_{eff}$ indexu v příloze A jsou referenční, platí pro jednotlivce, jejichž fyzická kondice jim umožňuje vykonávat pracovní aktivitu.

Pokud je $WBGT_{eff}$ hodnota nižší nebo rovna odpovídající referenční $WBGT_{eff}$, nejsou vyžadovány další opatření. Pokud je ale větší, je třeba tepelnou zátěž snížit.

Referenční hodnoty $WBGT_{eff}$ jsou reprezentativní pro účinek tepla přes poměrně dlouhý časový úsek práce. Neberou v úvahu extrémní hodnoty tepelné zátěže, kterým mohou být osoby vystaveny v krátkých časových intervalech (pár minut) jako výsledek mimořádně teplého prostředí nebo krátké intenzivní fyzické aktivity. V takových případech, kde jsou lidé vystaveni podmínkám na velmi krátkou dobu, může tepelná zátěž překročit přípustné hodnoty. Je možné další posouzení extrémních hodnot v dodatku, při použití mezinárodní normy (ISO 7933).

$WBGT$ hodnoty jsou různé pro aklimatizovanou a neaklimatizovanou osobu. Aklimatizovaný člověk je ten, který byl vystaven horkým pracovním podmínkám nejméně jeden pracovní týden. Lidé, kteří pracovali v takových podmínkách kratší dobu, jsou považováni za neaklimatizované.

A.1.12 Příloha A referenční hodnoty indexu tepelné zátěže WBGT

Tabulka A.1 – WBGT_{eff} referenční hodnoty pro pět tříd metabolické produkce

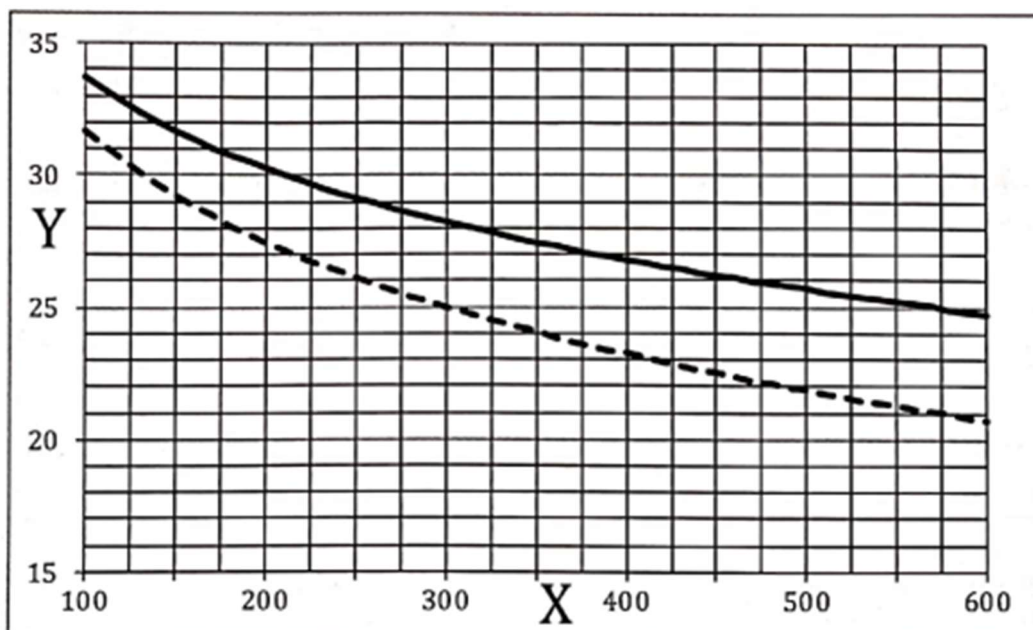
Metabolická produkce (třída)	Metabolická produkce [W]	WBGT referenční limit pro aklimatizovaného [°C]	WBGT referenční limit pro neaklimatizovaného [°C]
Třída 0 Odpočinek	115	33	32
Třída 1 Nízká	180	30	29
Třída 2 Střední	300	28	26
Třída 3 Vysoká	415	26	23
Třída 4 Velmi vysoká	520	25	20

Referenční hodnoty z Tabulky A.1 se používají pokud lze dobře určit metabolickou produkci na základě popisovaných tříd z tabulky E.1. Jestli-že je WBGT_{eff}, pro vyšetřované prostředí větší než WBGT_{eff} referenční, je třeba snížit tepelnou zátěž nebo fyzickou aktivitu.

Pokud je možné určit metabolickou produkci na pracovišti určit přesněji, dá se mezi referenčními hodnotami v Tabulce A.1 interpolovat.

Vzorec A.1 popisuje vztah mezi metabolickou produkcí a hodnotami WBGT_{eff}. Hodnoty v Tabulce A.1 se mohou nepatrně lišit od hodnot ze vzorce A.1.

Vzorec A.1 – WBGT_{eff} referenční hodnoty podle metabolické produkce



Obrázek 1

X metabolická produkce; [W]

Y WBGT_{eff}; [°C]

———— aklimatizovaní lidé

----- neaklimatizovaní lidé

WBGT_{eff} referenční hodnota pro aklimatizované lidi (plná čára)

$$\text{WBGT}_{\text{eff}} = 56,7 - 11,5 \log_{10}(M) \text{ } ^\circ\text{C}$$

WBGT_{eff} referenční hodnota pro neaklimatizované lidi (plná čára)

$$\text{WBGT}_{\text{eff}} = 59,9 - 14,1 \log_{10}(M) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kde M je metabolická produkce [W] v rozmezí $115 < M < 520$

Index nebere v potaz efekt velikosti těla nebo podobné charakteristiky, jako obezitu, výšku a šířku osob.

A.1.13 Příloha B – Měření parametrů použitých v indexu WBGT a specifikace měřicích přístrojů

A.1.13.1 Příloha B.1 Senzor teploty přirozeně mokrého teploměru

Teplota přirozeně mokrého teploměru je měřena teplotním senzorem zakrytým vlhčenou punčoškou, přes kterou proudí vzduch přirozeně, je umístěn do prostředí, kde není uvažována nucená ventilace. Senzor je vystaven teplotě vzduchu, radiaci, vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu ve vyšetřovaném prostředí. Teplota přirozeně vlhkého teploměru je odlišná od termodynamické teploty měřené psychrometrem.

Teplotní senzor by měl mít následující parametry:

- a) Tvar citlivé části senzoru: válcový;
- b) Vnější průměr citlivé části senzoru: $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$;
- c) Délka senzoru: $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$;
- d) Teplotní rozsah: od $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- e) Přesnost měření: $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- f) Celá citlivá část senzoru by měla být zakryta bílou punčoškou z materiálu s vysokou absorpcí vody (bavlna);
- g) Držák senzoru by měl mít průměr rovný 6 mm a 20 mm jeho délky má být zakryto punčoškou;
- h) Punčoška by měla být bavlněná ve tvaru rukávu přesně sedět na senzor (příliš volná přilnavost škodí přesnost měření);
- i) Punčoška musí být čistá;
- j) Spodní část punčošky by měla být ponořena v nádržce s destilovanou vodou a délka punčošky nad hladinou by měla být dlouhá 20 až 30 mm;
- k) Nádržka by měla být navržena tak, že se voda v ní obsažena nebude ohřívat v důsledku radiace z prostředí.

A.1.13.2 Příloha B.2 Senzor teploty kulového teploměru

Teplota kulového teploměru je zjišťována senzorem umístěným v centru koule s následujícími parametry:

- a) Průměr: 150 mm;
- b) Povrchovou emisivitu: 0,95 (matná černá koule);
- c) Tloušťka: co nejtenčí;
- d) Teplotní rozsah: 20 až 120 °C;
- e) Přesnost: měření:
 - rozsah 20 až 50 °C: $\pm 0,5$ °C
- f) - rozsah 50 až 120 °C: ± 1 °C

Poznámka: Materiál, z kterého je koule vyrobena, ovlivní čas pro ustálení přístroje. Materiál s vysokou tepelnou vodivostí, jako měď, sníží časovou konstantu, oproti materiálům s menší tepelnou vodivostí.

A.1.13.3 Příloha B.3 Měření teploty vzduchu

Teplota vzduchu se dá měřit více metodami, nezáleží na tvaru použitého senzoru. Nicméně, je nezbytné dodržovat opatření pro měření teploty vzduchu. Senzor pro měření by měl být zejména chráněn před radiací zařízením, které neovlivní cirkulaci vzduchu okolo senzoru a neodrazí radiaci na senzor. Měřicí rozsah pro teplotu vzduchu je 10 až 60 °C a přesnost $\pm 0,5$ °C.

A.1.14 Příloha C – Alternativní kulové teploměry

Senzory pro měření kulové teploty popsané v příloze B jsou jediné, které splňují požadavky tohoto dokumentu. Jiné kulové teploměry mohou být použity jako odhad, při použití platné korekce, použitím následujících rovnic. Je důležité poznamenat, že užití korekce pro velikost koule zahrnuje měření prostředí (rychlost proudění vzduchu, teplotu vzduchu). Přesnost odhadu proto závisí na přesnosti měření prostředí. Chyby v měření mohou být značné, takže všechny korekce pak budou obsahovat tyto nepřesnosti. Pokud není známa rychlost proudění vzduchu, korekci nelze provést.

Ustálená teplota, t , černého kulového senzoru (kulového teploměru, kde $t = t_g$) je dána rovnicí:

$$t = (1-g)t_a + gt_r$$

kde

t_a je teplota vzduchu;

t_r je střední radiační teplota;

g je koeficient odezvy záření

a pro nucenou konvekci ($v > 0,2$ m/s), lze g odhadnout z rovnice:

$$g = \frac{1}{(1 + 1,13v_a^{0,6}d^{-0,4})}$$

kde

v_a je rychlost proudění vzduchu [m/s];

d je průměr senzoru [m].

Rovnice C.1 předpokládá jednotnou emisivitu ε senzoru, což není dodrženo při použití jiné koule než černé. Více obecnou rovnicí je rovnice C.3:

$$t = \frac{(1-g)t_a + \varepsilon gt_r}{1 + (1-\varepsilon)g}$$

Pro stanovení teploty kulového teploměru s černou koulí o průměru 150 mm, t_{g150} , z teplot, t_{gd} , kulového teploměru s černou koulí o průměru d [mm], lze použít vzorec C.4:

$$t_{g150} = t_a + \frac{1 + 1,13v_a^{0,6}d^{-0,4}}{1 + 2,41v_a^{0,6}}(t_{gd} - t_a)$$

Vzorec C.4 v příkladu, teplota černého kulového teploměru s průměrem 150 mm je předvídána 25.5 °C přičemž pro kouli s průměrem 100 mm je 25 °C.

Tabulka C.1 – Příklady výpočtů pro předvídanou teplotu černého kulového teploměru s poloměrem 150 mm

Průměr koule d [mm]	Kulová teplota t_g [°C]	Teplota vzduchu t_a [°C]	Rychlost proudění vzduchu v_a [m/s]	Předpovídaná teplota kulového teploměru [°C]
50	22	20	0,5	22,5
100	25	20	0,5	25,5
25	25	25	0,2	25
50	30	25	0,5	31,4
100	40	25	0,75	41,7
120	45	25	1	46,3
25	25	20	1	28,7
50	30	30	0,75	30
100	40	30	0,5	41
120	50	30	0,2	50,9
25	25	25	0,25	25
50	30	30	1	30
100	40	35	2	40,6
120	50	40	2	50,7

A.1.15 Příloha D – Předvídaná teplota přirozeně mokrého teploměru

Nepřímé stanovení t_{nw} výpočtem není jednoduché ani seriózní, obzvláště když je rychlost proudění vzduchu nízká za podmínek přirozené konvekce. Není to doporučeno, avšak v určitých případech to může být nápomocné. Na základě rovnice tepelné rovnováhy lze získat teplotu přirozeně vlhkého teploměru t_{nw} [°C] z parametrů: teploty vzduchu t_a , střední radiační teploty t_r [°C], rychlosti proudění vzduchu v_a [m/s] a relativní vlhkosti RH. Toto umožňuje rovnice D.1:

$$4,18 \cdot v_a^{0,444} (t_a - t_{nw}) + 10^{-8} \cdot [(t_r + 273)^4 - (t_{nw} + 273)^4] - 77,1 \cdot v_a^{0,421} [p_{as}(t_{nw}) - RH \cdot p_{as}(t_a)] = 0$$

Kde je střední radiační teplota dána vztahem

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v_a^{0,6}}{\varepsilon_g \times d^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

kde: d je průměr černé koule [m]; ε_g je emisivita a p_{as} je tlak nasycených vodních par [kPa].

Tento odhad by měl být použit pouze, pokud není možné hodnotu přímo změřit. Je potřeba pamatovat na to, že při výpočtu teploty přirozeně mokrého teploměru jsou použité hodnoty získané měřením prostředí spojené s chybami měření. Nejpřesnější metodou je přímé měření popsané v příloze B.

Příklady výpočtů teploty přirozeně mokrého teploměru pomocí vzorce D.1 v Tabulce D.1.

Tabulka D.1 Příklady předpokládané teploty přirozeně mokrého teploměru použitím vzorce D.1 (v rozmezí 15 až 30 °C)

Teplota vzduchu t_a °C	Kulová teplota pro 150mm průměr t_g °C	Rychlost vzduchu v_a m/s	Relativní vlhkost RH %	Predikovaná tep. mokrého teploměru t_{nw} °C	Predikované WBGT °C
25	40	0,3	20	17,3	24,1
25	55	0,3	20	21,1	31,3
25	40	0,9	20	16,7	23,7
25	40	0,3	50	21,7	27,2
25	55	0,3	50	25	34
25	40	0,9	50	21,4	27
25	40	0,3	80	25,5	29,8
25	55	0,3	80	28,4	36,4
25	40	0,9	80	25,3	29,7
35	35	0,3	20	19,7	24,3
35	50	0,3	20	23,1	31,2
35	65	0,3	20	26,4	38
35	35	0,9	20	19,1	23,9
35	50	0,9	20	22,5	30,7
35	35	0,3	50	26,5	29,1
35	50	0,3	50	29,2	35,5
35	35	0,9	50	26,3	28,9
35	50	0,9	50	28,9	35,2
45	45	0,3	20	26,1	31,8
45	60	0,3	20	29	38,3
45	45	0,9	20	25,6	31,4
45	60	0,9	20	28,3	37,8

A.1.16 Příloha E – Stanovení metabolické produkce

Tabulka E.1 – Klasifikace úrovní metabolické produkce podle ISO 8996

Třída	Metabolická produkce [W]	Příklady
0 Odpočinek	115 (100 - 125)	Klid (odpočinek)
1 Nízká metabolická produkce	180 (125 - 235)	Sezení v klidu: lehká manuální práce (psaní, kreslení, šití, účetnictví); práce rukou a paží (drobné pracovní nástroje, kontrola, sestavování nebo třídění lehkých předmětů); práce paží a nohou (řízení vozidla za běžných podmínek, obsluha nožního spínače nebo pedálu). Stání: vrtání, frézování (drobné součástky); navíjení cívek; řezání závitů malých armatur; obrábění s malým úsilím; občasná chůze (rychlost do 3,5 km/h).
2 Střední metabolická produkce	300 (235 - 360)	Stálá práce rukou a paží (zatloukání hřebíků, plnění); práce paží a nohou (řízení - provoz nákladních aut, traktorů a stavebních strojů); práce paží a trupu (práce s pneumatickým kladivem, montáž traktorů, omítání, přerušovaná manipulace se středně těžkým materiálem, pletí, práce s motikou, sběr ovoce nebo zeleniny; tlačení nebo tahání lehkých vozíků; chůze rychlostí 3,5 km/h až 5,5 km/h; kování).
3 Vysoká metabolická produkce	415 (360 - 465)	Intenzivní práce paží a trupu; nošení těžkého materiálu; práce s lopatou; práce s perlíkem; řezání, hoblování nebo sekání tvrdého dřeva; ruční sečení trávy; kopání; chůze rychlostí 5,5 km/h až 7 km/h. Tlačení nebo tahání ručních vozíků s těžkým nákladem; otloukání odlitků; pokládání betonových tvárnic.
4 Velmi vysoká metabolická produkce	520 (>465)	Velmi intenzivní činnost v rychlém až maximálním tempu; práce se sekyrou; intenzivní práce s lopatou nebo kopání; chůze do schodů, na rampu nebo stoupání po žebříku; rychlá chůze malými kroky, běh, chůze rychlostí vyšší než 7 km/h.

A.1.17 Příloha F – Koeficient upravující vliv oblečení (CAV)

Tabulka F.1 – WBGT CAV hodnoty pro různé soupravy oblečení ve °C - WBGT

Soupravy oblečení	Popis	CAV [°C-WBGT]
Pracovní oblečení	Pracovní oděvy ze tkané látky jsou referenčními soubory oblečení	0
Tkaninové kombinézy	Tkaná látka obsahující ošetřenou bavlnu	0
Kombinézy z netkané textilie jako jedna vrstva	Netkaná textilie vyrobená z polypropylenu	0
Kombinézy z netkané textilie jako jedna vrstva	Netkaná textilie vyrobená z polyethylenu	2
Parotěsná zástěra s dlouhými rukávy přes tkaninovou kombinézu	Zástěra je navržena tak, aby chránila přední a boční strany těla proti únikům chemických agencí	4
Dvojitá vrstva tkaninového oblečení	Obecně bráno jako kombinézy přes pracovní oblečení	3
Parotěsná kombinéza bez kapuce - jedna vrstva	Reálný účinek závisí na úrovni vlhkosti v mnoha případech je menší	10
Parotěsná kombinéza s kapucí - jedna vrstva	Reálný účinek závisí na úrovni vlhkosti v mnoha případech je menší	11
Parotěsná kombinéza bez kapuce přes oblečení	—	12
Kapuce	Kapuce z jakékoliv látky nošená s jedním ze souborů oblečení	...+1



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

B.VÝPOČTOVÁ ČÁST

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Sliva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2019

B.1 Popis objektu

Jedná se o část průmyslové haly s technologií práškové lakovny. Objekt je umístěn v technologickém parku VIENNA point na hlavní třídě Brno-Vídeň v Jihomoravském kraji. Hala má železobetonovou montovanou nosnou konstrukci obvodových stěn a nosná konstrukce střechy je realizována železnými vazníky. Obvodový plášť stěn sestává z lehké ocelové konstrukce s tepelně izolačními panely, střecha je oplášťena železobetonovými kazetovými panely a tepelnou izolací a PVC krycí vrstvou, vprostřed je umístěný světlík z plexiskla. Lakovna se nachází v jihozápadní části průmyslové haly. Z jižní a západní strany jsou stěny do exteriéru, ze severní a východní do interiéru. Pro technologickou linku práškové lakovny je vyhrazena část o půdorysných rozměrech 36 x 24 m a výškou 14 m.

B.2 Popis výrobní technologie

Celý proces povrchové úpravy se provádí na průběžné lince, která je dodávkou společnosti ITS Brno. Pro předúpravu povrchu výrobků pro lakování se používá několikastupňového pracoviště předúpravy, kde dojde k odmaštění a aplikaci fosfátovacího přípravku, který zaručuje adhezi pro práškové nátěrové hmoty. Poté je výrobek v sušící peci osušen, následuje proces aplikace práškových nátěrových hmot ve stříkací kabině a samotné vypálení práškové nátěrové hmoty ve vypalovací peci. Technologický postup:

- a) Výrobky jsou navěšeny pracovníky na automatický dopravník.
- b) V chemické předúpravě se výrobky sprchují pro očištění, odmaštění a zlepšení adhezních vlastností povrchu.
- c) Sušení výrobků v sušící peci.
- d) Nanášení práškové hmoty v automatické lakovně v kombinaci s ručním nanášením.
- e) Vypalování laku ve vypalovací peci
- f) Chladnutí výrobků na automatickém dopravníku a následné svěšení a skládání dílců na europalety pracovníky.

B.3 Výpočetní model

V horkých letních měsících, okolí exteriéru neochotně přejímá teplo produkované technologií a přiváděný vzduch do haly má vysokou teplotu, jelikož není upravován, pracovní podmínky jsou pak neúnosné. Účinku tepelné zátěže na lidi navíc přidává i vysoká relativní vlhkost prostředí, která je taktéž produktem výrobní technologie. Tepelná produkce vzniká především nepřetržitým provozem vypalovací a sušící pece, teplo je pak distribuováno do prostředí haly pomocí lakovaných výrobků, které po dráze automatického dopravníku předávají teplo do okolí. Technologie chemické předúpravy také produkuje teplo a se svou velikostí přidá do pracovního prostředí nezanedbatelné množství tepelných zisků.

Pro výpočetní model jsou nejdůležitějšími místy pracovní zóny. Nejkritičtějších hodnot kvality pracovního prostředí je dosahováno tam, kde horké výrobky emitují na pracovníky teplo radiací. Z důvodu toho, že má hala světlou výšku 14 m a vysoké energetické produkce technologie, jsou solární zisky světlíkem ve střeše zanedbány.

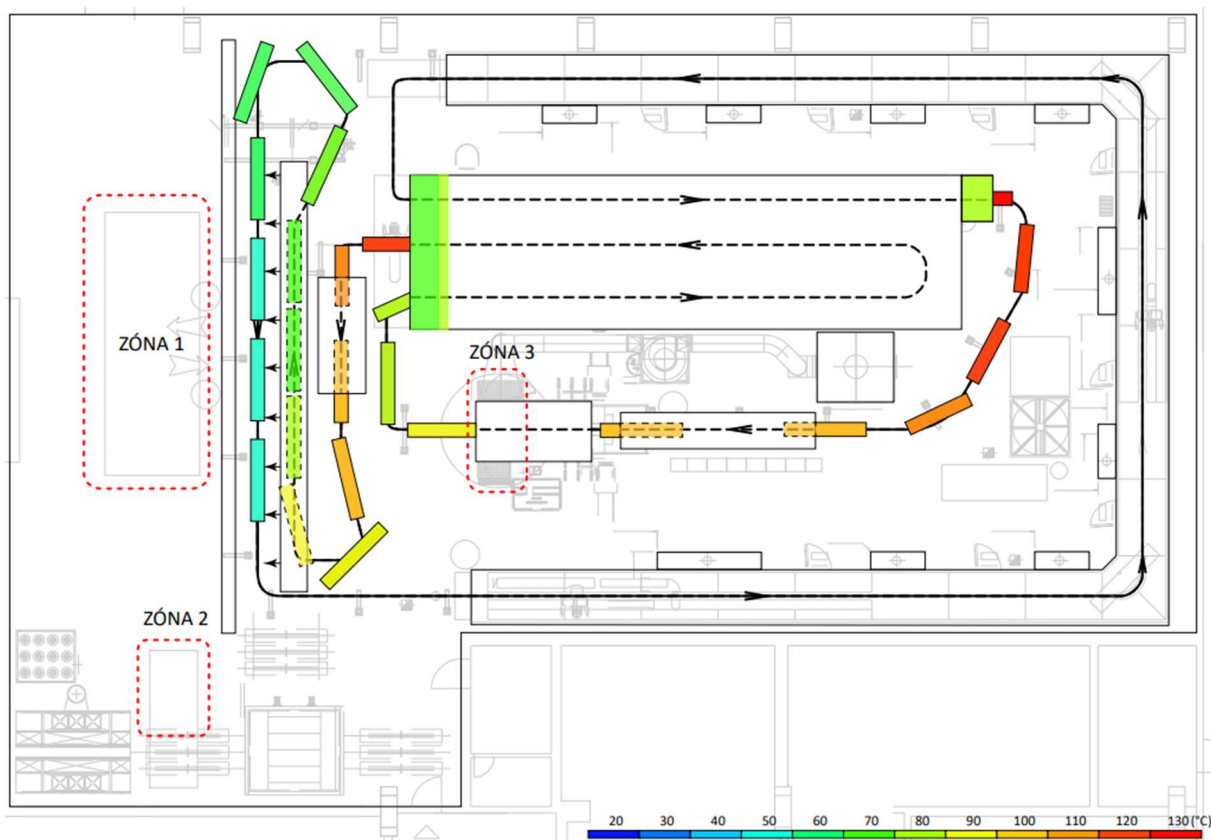
Na základě výše popsaného se k výpočtu simulace pracovních podmínek přistupuje následujícím postupem:

1. Měření teplot a rychlostí proudění vzduchu na pracovišti práškové lakovny.
2. Vytvoření 3D modelu části haly s výrobní linkou
3. Stanovení povrchových teplot jednotlivých ploch v modelu.
4. Nastavení charakteristik vzduchotechniky uvnitř haly.
5. Výpočet vlhkostních poměrů na pracovišti.
6. Vyhodnocení pracovních podmínek pomocí indexu WBGT.

Důležité informace o provozu lakovny od investora:

- Maximální rozměry jednoho výrobku: 2,5 x 1,5 x 0,5 m při maximální hmotnosti 100 kg
- Rychlost automatického dopravníku je 1,5 m/min.

- Vháněný vzduch do lakovny je realizován pomocí dvou textilních vyústek VZT, jeden textilní rukáv přivádí nepřetržitě 3,78 m³/s, druhý rukáv se zapíná dle potřeby, během letních kritických měsíců a to 1,89 m³/s. Odvod je realizován přes chemickou předúpravu.
- Vháněný vzduch se nijak neupravuje (není chlazen).
- Teplota vzduchu na vyšetřovaných pracovních zónách, ovlivněná teplotní radiací z výrobků dosahuje hodnot 40 – 60 °C.
- Relativní vlhkost prostředí při teplotě vzduchu 30 °C, neovlivněné radiací z výrobků, je 50 %.
- Lakovna je v provozu nepřetržitě 24 denně.



Obrázek 2

V lakovací lince jsou 3 pracovní zóny. V zóně 1 u automatického dopravníku zaměstnanci podniku navěšují výrobky o teplotě interiéru a sundávají je při teplotách až 50 °C, takže při lakování velmi těžkých výrobků musí zastavit dopravník a čekat, než dílce vychladnou. Investor požaduje zlepšení pracovních podmínek primárně této zóny. Druhá zóna nevyžaduje chladit. Ve třetí zóně, lakovacím boxu, pracovníci nastříkují lak na výrobky,

nemusí zde trávit tolik času, takže zde tepelná zátěž může dosahovat vyšších hodnot, nicméně zlepšení pracovních podmínek by bylo velmi vítané.

B.3.1 Měření teplot a rychlostí proudění vzduchu

B.3.1.1 Použité měřicí přístroje

Veškeré měřicí přístroje byly zapůjčeny ze školního depozitáře. Jedná se o přístroje: termokameru FLIR e50 Obr. 1, termokameru FLUKE ti45 Obr. 2, kontaktní čidlo AHLBORN ALMEMO FTA 109PH Obr. 3, žárový anemometr AHLBORN ALMEMO FVA935TH5 Obr. 4, ústřednu AHLBORN ALMEMO 2590 Obr. 5 a kulový teploměr.



Obrázek 7



Obrázek 6



Obrázek 5



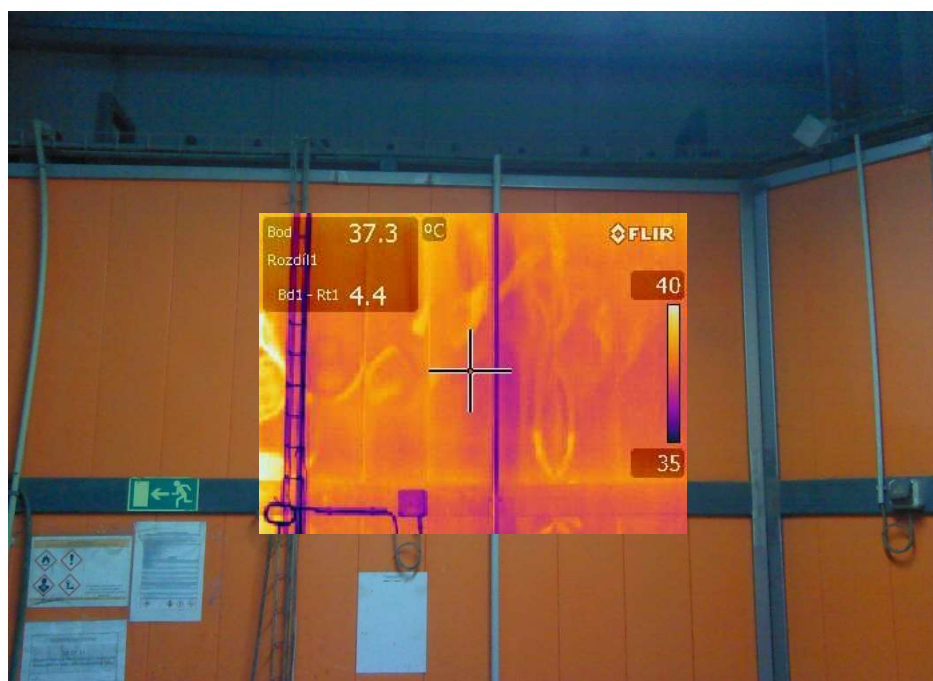
Obrázek 4



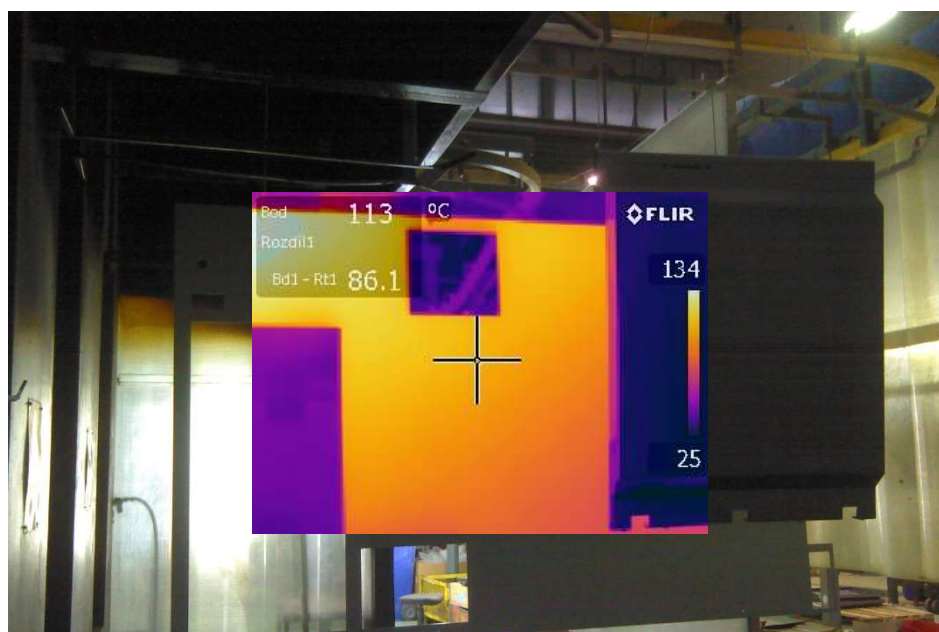
Obrázek 3

B.3.1.2 Způsob měření

Pro důvěryhodnost naměřených hodnot termokamer je nezbytná kalibrace emisivit povrchů. U termokamery FLIR e50 se emisivita kalibrovala před pořízením každého termosnímku tak, že se ručně nastavila teplota bodu na obrazovce zaměřeného laserem a změřeného kontaktním čidlem. V druhém případě se emisivita kalibrovala dodatečně v softwaru Fluke Connctet.



Obrázek 8



Obrázek 9

Při měření kontaktním čidlem a žárovým anemometrem se před odečtením hodnoty teploty nebo rychlosti proudění vzduchu vyčkalo, než se číslo ustálilo a až posléze se hodnota zaznamenala. Byla odečítána i teplota kulového teploměru s černou koulí o poloměru 150 mm, teploměr nebylo možné instalovat do místa pracovní zóny s nejvyšší prioritou pro snížení tepelné zátěže, tak byl umístěn k lakovně Obr.9, kde byly účinky prostředí nejbližší pracovní zóně. Teploměr se ustavil a po 30 minutách ustálení byly každých 5 minut odečítány hodnoty po dobu jedné hodiny. Nicméně, prostředí provozu lakovny neumožnilo požadované podmínky pro měření kulovým teploměrem, a tak znehodnotily naměřené hodnoty a dále s nimi nebylo počítáno.



Obrázek 11



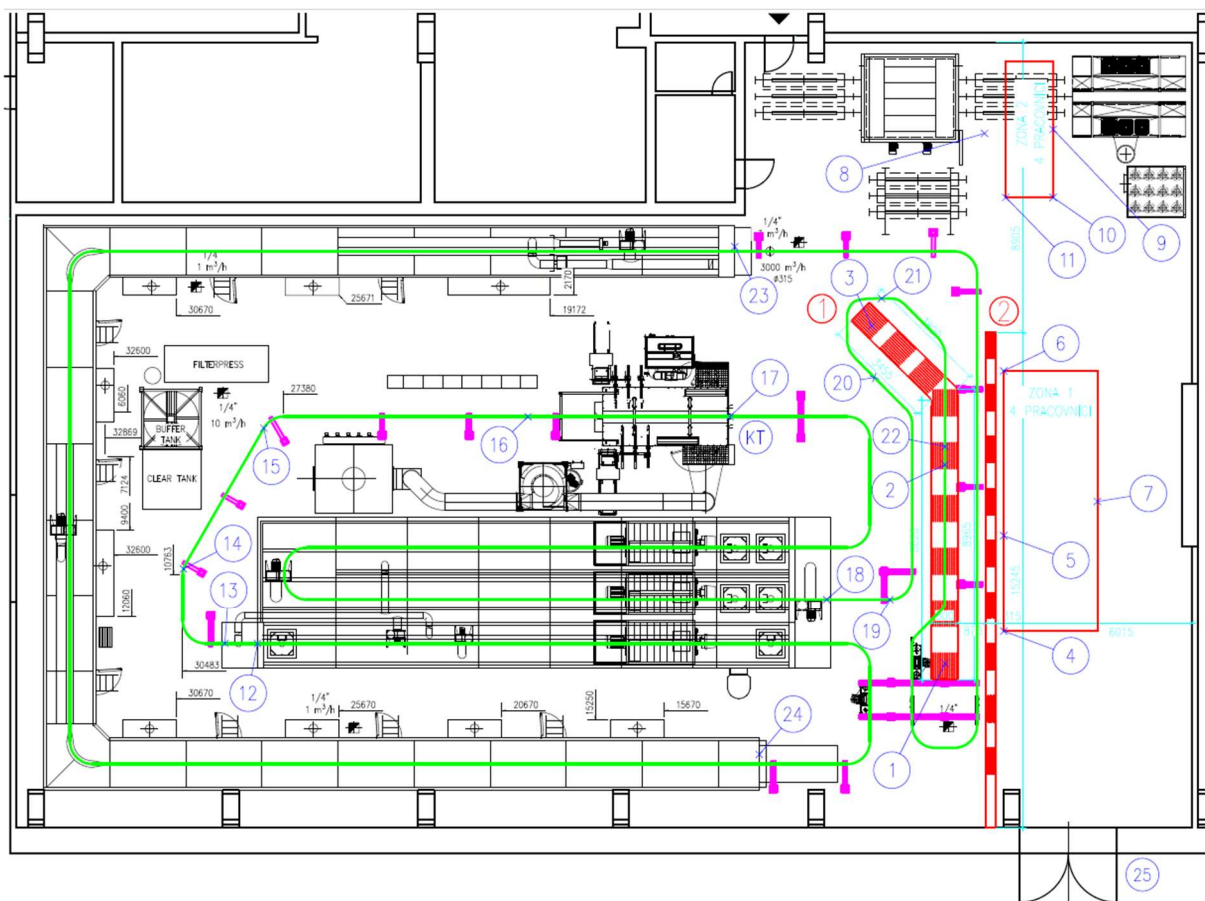
Obrázek 10

B.3.1.3 Měřená místa a hodnoty

Byly měřeny teploty a rychlosti proudění vzduchu žárovým anemometrem AHLBORN ALMEMO FVA935TH5 Obr.4v prostoru haly, obzvláště pak ve vyšetřovaných pracovních zónách a u perforací v textilním potrubí VZT pro přívod vzduchu.

Povrchové teploty se měřily na: chemické předúpravě, vypalovací a sušící peci, ochranných clonách před pecí, podlahách a stěnách haly, lakovně a také na výrobcích obíhajících po automatickém dopravníku. Naměřená data termokamerami byly dále zpracovány v softwarech Fluke Connctet a Flir tools, odkud byly zjištěny průměrné teploty vyznačených ploch termosnímků. Průměrné hodnoty byly zapsány do tabulky.

Měřená místa v prostoru haly v půdorysu



Obrázek 12

**Teploty a rychlosti proudění vzduchu žárovým anemometrem AHLBORN ALMEMO
FVA935TH5**

BOD		t [°C]	v [m/s]	BOD		t [°C]	v [m/s]
PŘÍVOD VZDUCHU Ø800mm	1	24,2	5,8	ZÓNA1	4	26,1	0,09
		25	2,9		5	25,5	0,19
		25,6	1,98			27,5	0,01
		25,2	3,04		6	24,8	0,26
		25	2,98		7	25,8	0,42
	2	23,5	3,5	ZÓNA 2	8	25,4	0,11
		23	4,4		9	24,7	0,22
		24,1	5,36		10	24,6	0,21
	3	20,5	4,86	ZÓNA 2	11	24,8	0,08
		21,4	4,1		17	29,9	0,2
		21,2	3,6			30,4	0,21
		21,6	3,2	VENKOVNÍ TEPLOTA	25	14,7	0,3
		20,7	3,7			17,5	0,9
ODVOD VZDUCHU CHEM. LINKOU	23	27,6	0,6	TRASA VÝROBKU	12	31,2	0,16
		29,9	0,3		13	29,4	0,04
		24,7	0,81		14	29	0,02
	24	24,2	0,2		15	29,2	0,02
		26,7	0,28		16	29,3	0,04
		22,6	0,65		17	29,9	0,2
ZÓNA1	4	26,1	0,09			30,4	0,21
	5	25,5	0,19		18	31,2	0,57
		27,5	0,01		19	28,4	0,04
	6	24,8	0,26		20	28	0,1
	7	25,8	0,42		21	26,1	0,15
ZÓNA 2	8	25,4	0,11		22	25,7	0,23
	9	24,7	0,22				
	10	24,6	0,21				
	11	24,8	0,08				
ZÓNA 2	17	29,9	0,2				
		30,4	0,21				
VENKOVNÍ TEPLOTA	25	14,7	0,3				
		17,5	0,9				

Průměrné teploty termosnímků pořízené termokamerami FLIR e50 a FLUKE ti45

chemická předúprava		pec obvod	čelo sušení	čelo vypal.	clona měkká	podlaha za clonou	výrobek z pece
31,7	38,7	38	75,8	47,7	33,2	32,3	126,5
32	37,6	37,6	75,6	66,2	clona naproti pece	podlaha před pecí	114,8
32,6	39,9	38,2	87,1	53,8			110,1
33,7	39,6	41	68,9	68,7			114,7
32,7	36,2	39,7	odtah vypal.	odtah sušení			111,4
34,6	36,6	37,2					36,1
34,9	35	37			clona narožku pece		výrobek ze sušení
35,5	34,1	43,8					
34,4	35,3	37,8	54,9	48,2			
35,1	34,2	37,4	48,7	71,3			
34,3	34,3	41,1	60,6	74	41,3		129,1
35	32,5	37,1	77,9				137,8
34,1	33,7	41,2	82,9				126,5
32,6		43,5	81,4				
33,9		48,1	48,9				
37		38,6					

Pozice každého termosnímků byla vyfotografována i běžným fotoaparátem, pro přesné určení pozice, aby se při nastavování povrchové teploty jednotlivých částí geometrie počítalo s průměry správných termosnímků.

B.3.2 Tvorba 3D modelu

Při tvorbě 3D modelu je třeba co nejvěrněji zobrazit vyšetřovaný prostor, zejména pak ty části, kde se nachází pracovní zóny, jejichž prostředí se hodnotí. Na druhou stranu je třeba mít na paměti, že čím bude model větší a složitější, tím náročnější bude na výpočet. Proto je nutné vytvořit model, který bude respektovat výpočetní kapacitu tím, že bude do jisté míry vůči realitě idealizován. Je třeba najít optimální verzi, která bude nejlépe popisovat realitu a zároveň bude geometricky co nejjednodušší.



Obrázek 13



Obrázek 14



Obrázek 15

Při modelování geometrie je třeba pamatovat na to, že se na jedné geometrii budou simulovat všechny navrhované a původní stavy. Jelikož hrany jednotlivých částí – bloků geometrie dávají vzniku výpočetní síti, jejíž výsledky se porovnávají, musí být výpočetní síť geometrie v každé simulaci stejná, aby se simulované hodnoty daly porovnávat.

Musí se proto nejprve definovat všechny geometrické bloky potřebné pro realizaci všech navrhovaných stavů a až následně tvořit geometrii.

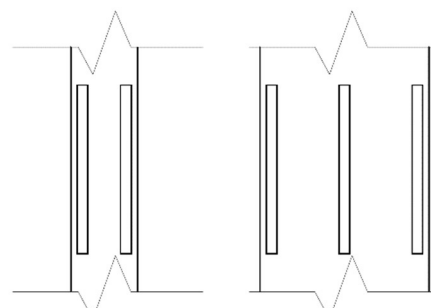
Pokud se při dané simulaci geometrický blok nevyskytuje, v okrajových podmínkách se nastaví možnost – Vzduch může procházet skrze hmotu. Výpočetní síť se nezmění, ale simulace bude probíhat, jako by se tam blok nenacházel.

Při tvorbě geometrie bylo jedním ze zásadních faktorů stanovení kritického výrobku. Maximální rozměry jednoho výrobku jsou 2,5 x 1,5 x 0,5 m při maximální hmotnosti 100 kg. Nejkritičtějšími výrobky, co se týče tepelné zátěže na pracovníky, jsou ty nejtěžší, které nejpomaleji chladnou, a pak září na pracovní zónu s velkou intenzitou. Rozměry kritického výrobku byly odvozeny od maximální hmotnosti $m = 100 \text{ kg}$, největší tloušťky lakovaných plechů $s = 5 \text{ mm}$ a hustoty železa 7850 kg/m^3 . $A_{\text{krit}} = 1 \times 2,5 \text{ m}$.

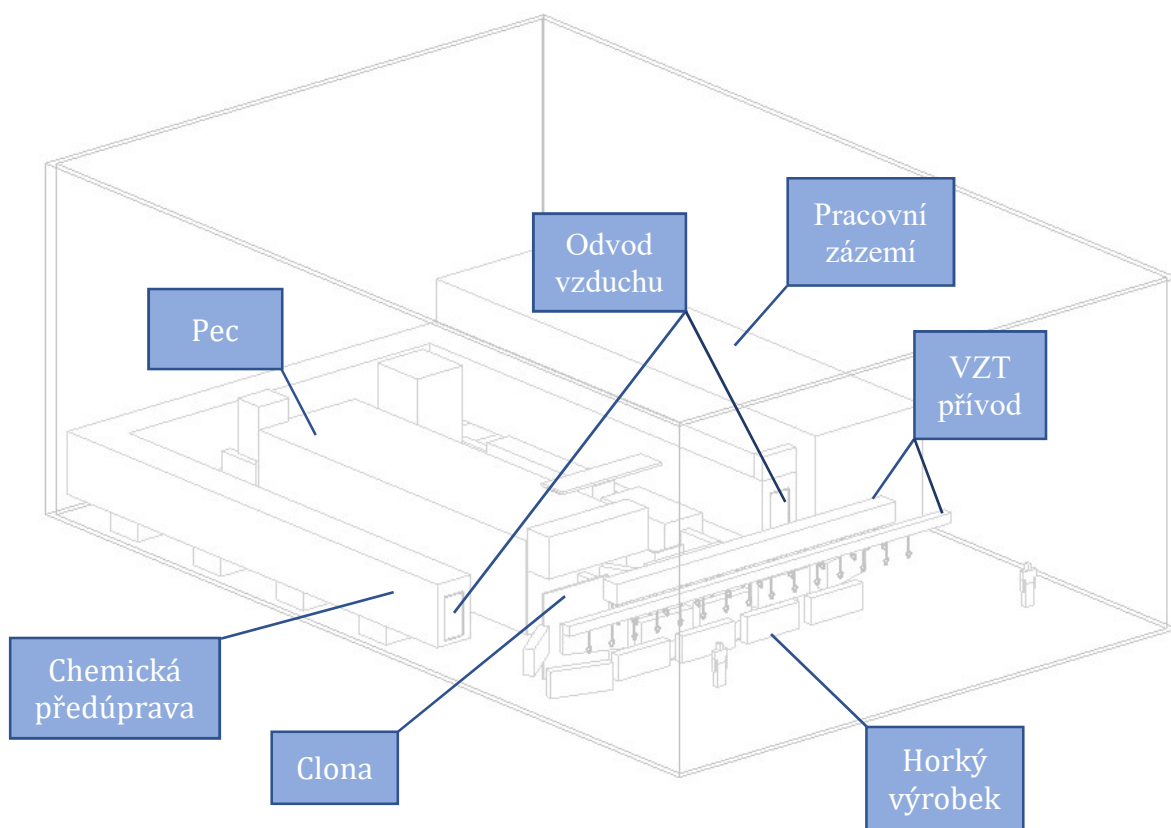
Dalším důležitým faktorem pro věrné postihnutí proudění vzduchu v prostoru haly je správná idealizace geometrie vyústek VZT. Idealizace je nezbytná, poněvadž se, v obou textilních rukávech dohromady, nachází 5139 perforací, což je vzhledem k výpočetní kapacitě nepřijatelné. Perforace jsou po délce potrubí rozděleny do 9 částí.



Obrázek 16



Obrázek 17



Obrázek 18

Na obrázku 18 je výsledná geometrie. Obsahuje nejdůležitější části technologie: pec, chemickou předúpravu, clony proti radiaci, přívodní distribuční prvky, horké výrobky. Dále pak geometrii potřebnou pro navrhovaná opatření: chladicí boxy, odtah vzduchu nad pecí a pro ilustraci osoby pracovníků.

B.4 Výpočet chladnutí výrobků

Jelikož nebylo možné během měření zjistit povrchové teploty výrobku v každé pozici na automatickém dopravníku a kvůli jiným rychlostem ochlazování při navrhovaných stavech, bylo nutné chladnutí výrobků v čase, v závislosti na okolním prostředí vyjádřit pomocí rovnic.

Byl použit výpočetní model chladnutí těles při malých Biotových číslech, toto bylo možné na základě vysoké tepelné vodivosti materiálu výrobků, malém součiniteli

přestupu tepla ve výrobních podmínkách lakovny a proto, že jsou lakované výrobky tak tenké.

Pokud: $\lambda \uparrow$ a $\alpha \downarrow$ pak: $Bi = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda} \ll 1$ a $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty$

Pro změnu součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti proudění vzduchu se vy výpočtu užívá odvozené rovnice z ASHRAE Fundamentals Handbook.

$$v \in [5; 30] \text{ ms}^{-1} \quad \alpha = 7,2v^{0,78}$$

$$v < 5 \text{ ms}^{-1} \quad \alpha = 5,62 + 3,9v$$

Vzorce pro výpočet výrobku v čase:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \frac{s}{2}}{\lambda}$$

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{\left(\frac{s}{2}\right)^2}$$

$$\frac{T_{\tau} - T_0}{T_a - T_0} = e^{-K \cdot Bi \cdot Fo}$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Kde:

s - tloušťka plechu [m]

α - součinitel přestupu tepla [W/m²K]

λ - tepelná vodivost materiálu [W/mK]

τ - čas chlazení [s]

c - měrná tepelná kapacita materiálu [J/kgK]

ρ - hustota materiálu [kg/m³]

K - geometrický součinitel [-] pro plech o tloušťce s: K = 1

Pro výpočet rychlosti chlazení výrobků při adiabatickém chlazení postřikem malými kapičkami vody. Teplota vody není pro výpočet zásadní, protože se drtivá většina energie výrobků odebere fázovou změnou vody, která pojme mnohem více tepla než

navýšení teploty vody. Bylo využito vzorce z ASHRAE Fundamentals Handbook vyjadřující součinitel přestupu tepla při varu vodní hladiny, v našem případě se jedná o odpar malých kapiček vody s obrovskou teplosměnnou plochou, takže vypočtený součinitel tepla α je ponížen na stranu bezpečnou.

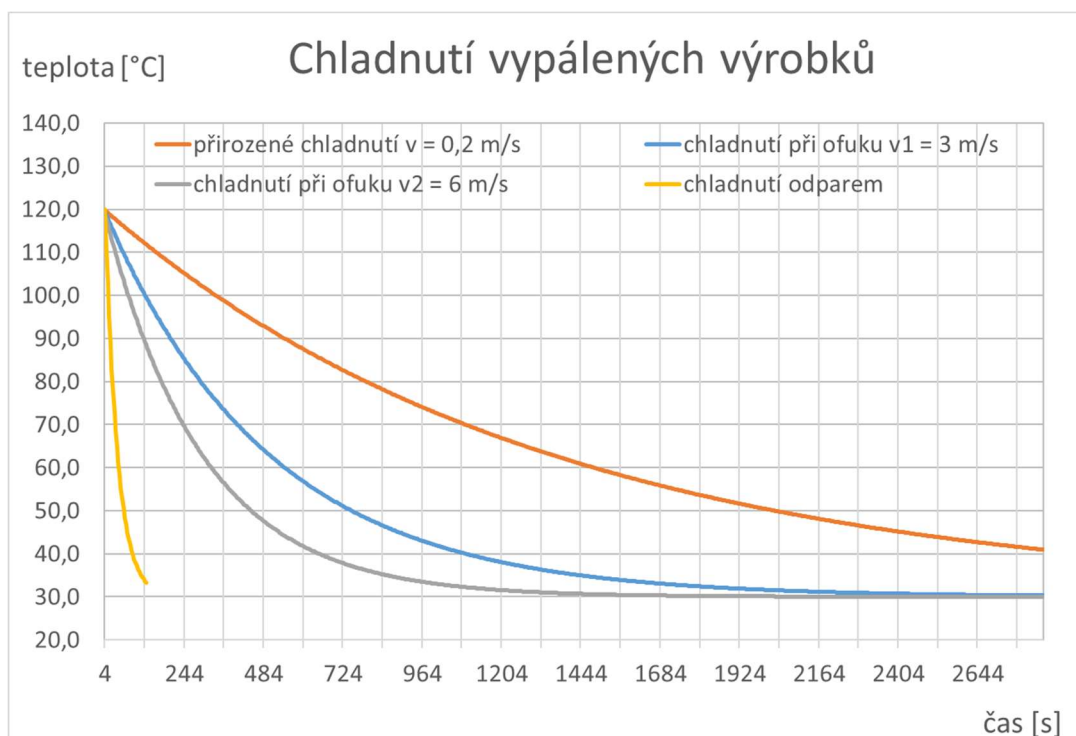
$$\alpha = 0,425 \left[\frac{k_v^3 \rho_v h_{fg} g (\rho_l - \rho_v)}{\mu_v (t_w - t_{sat}) \sqrt{\Phi_t / g (\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0,25}$$

$$(t_w - t_{sat}) = 0,127 \frac{\rho_v h_{fg}}{k_v} \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\sigma_t}{g (\rho_l - \rho_v)} \right]^{0,5} \left[\frac{\mu_v}{\rho_l - \rho_v} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Kde:

g	-	gravitační zrychlení [m/ s ²]
ρ_v	-	hustota syté páry [kg/m ³]
ρ_l	-	hustota syté kapaliny [kg/m ³]
h_{fg}	-	latentní teplo pro výpar [kJ/kg]
k_v	-	tepelná vodivost páry [W/mK]
t_{sat}	-	teplota nasycení [K]
t_w	-	teplota vody [K]
μ_v	-	viskozita syté páry [m ² /s]
σ_t	-	povrchové napětí [N/m]
Φ_t	-	Martinelliho parametr

Všechny výše uvedené vztahy byly použity pro vytvoření interaktivního excelu, který ukazuje průběh chlazení výrobků v závislosti na proudění okolního vzduchu a na adiabatickém chlazení. Vstupní hodnoty vychází z fyzikálních vlastností materiálu výrobků a naměřených teplot: teplota výrobku vyjíždějícího z vypalovací či sušící pece, teplotě vzduchu a rychlosti proudění vzduchu.



Obrázek 19

$\alpha =$	6,4	W/m ² K	$t_{\text{počátek}} =$	120	°C	$\alpha_1 =$	17,32	W/m ² K	$v_1 < 5$ m/s	3	m/s	$\alpha_3 =$	228,7	W/m ² K
$c =$	440	J/kgK	$t_{\text{okolí}} =$	30	°C	$\alpha_2 =$	29,12665	W/m ² K	$v_2 (5-30 \text{ m/s})$	6	m/s	$Bi_3 =$	0,009858	
$\rho =$	7850	kg/m ³				$Bi_1 =$	0,000747							
$s/2 =$	0,0025	m				$Bi_2 =$	0,001255							
$\lambda =$	58	W/mK												
$K =$	1													
$Bi =$	0,00028													
$a =$	1,7E-05													

x - dráha [m]	τ - čas [s]	Fo - konst.	e^{-KBiFo}	$t_1 - t_{ni}$	t - teplota	e^{-KBi_1Fo}	e^{-KBi_2Fo}	$t_{1;1-t_{ni}}$	$t_{2;1-t_{ni}}$	t_1 - teplota	t_2 - teplota	e^{-KBi_3Fo}	$t_{3;1-t_{ni}}$	t_3 - teplota
0	0	0	1	30	120,0	1	1	30	30	120,0	120,0	1,0	30,0	120,0
0,1	4	10,74696	0,99704	30,26643	119,7	0,992009	0,986598	30,7192	31,20616	119,3	118,8	0,9	39,0	111,0
0,2	8	21,49392	0,994088	30,53206	119,5	0,984082	0,973376	31,43264	32,39615	118,6	117,6	0,8	47,2	102,8
0,3	12	32,24088	0,991145	30,79691	119,2	0,976218	0,960331	32,14039	33,5702	117,9	116,4	0,7	54,5	95,5
0,4	16	42,98784	0,988211	31,06098	118,9	0,968417	0,947461	32,84248	34,72851	117,2	115,3	0,7	61,1	88,9
0,5	20	53,7348	0,985286	31,32427	118,7	0,960678	0,934763	33,53896	35,87129	116,5	114,1	0,6	67,0	83,0
0,6	24	64,48176	0,982369	31,58677	118,4	0,953001	0,922236	34,22988	36,99877	115,8	113,0	0,5	72,3	77,7
0,7	28	75,22872	0,979461	31,8485	118,2	0,945386	0,909876	34,91527	38,11113	115,1	111,9	0,5	77,1	72,9
0,8	32	85,97568	0,976562	32,10945	117,9	0,937831	0,897682	35,59519	39,20858	114,4	110,8	0,4	81,4	68,6
0,9	36	96,72264	0,973671	32,36964	117,6	0,930337	0,885652	36,26968	40,29133	113,7	109,7	0,4	85,3	64,7
1	40	107,4696	0,970788	32,62905	117,4	0,922903	0,873783	36,93877	41,35956	113,1	108,6	0,3	88,8	61,2
1,1	44	118,2166	0,967915	32,88769	117,1	0,915528	0,862072	37,60252	42,41348	112,4	107,6	0,3	91,9	58,1
1,2	48	128,9635	0,965049	33,14557	116,9	0,908212	0,850519	38,26096	43,45328	111,7	106,5	0,3	94,8	55,2
1,3	52	139,7105	0,962192	33,40268	116,6	0,900954	0,839121	38,91414	44,47914	111,1	105,5	0,3	97,3	52,7
1,4	56	150,4574	0,959344	33,65903	116,3	0,893754	0,827875	39,5621	45,49125	110,4	104,5	0,2	99,6	50,4
1,5	60	161,2044	0,956504	33,91463	116,1	0,886612	0,81678	40,20489	46,4898	109,8	103,5	0,2	101,6	48,4
1,6	64	171,9514	0,953673	34,16947	115,8	0,879527	0,805834	40,84254	47,47497	109,2	102,5	0,2	103,5	46,5
1,7	68	182,6983	0,950849	34,42355	115,6	0,872499	0,795034	41,47509	48,44693	108,5	101,6	0,2	105,1	44,9
1,8	72	193,4453	0,948035	34,67688	115,3	0,865527	0,784379	42,10259	49,40586	107,9	100,6	0,1	106,6	43,4
1,9	76	204,1922	0,945228	34,92946	115,1	0,85861	0,773867	42,72507	50,35195	107,3	99,6	0,1	108,0	42,0
2	80	214,9392	0,94243	35,18129	114,8	0,851749	0,763496	43,34258	51,28536	106,7	98,7	0,1	109,2	40,8
2,1	84	225,6862	0,93964	35,43238	114,6	0,844943	0,753264	43,95515	52,20625	106,0	97,8	0,1	110,3	39,7
2,2	88	236,4331	0,936859	35,68273	114,3	0,838191	0,743169	44,56283	53,11481	105,4	96,9	0,1	111,2	38,8
2,3	92	247,1801	0,934085	35,93233	114,1	0,831493	0,733209	45,16565	54,01119	104,8	96,0	0,1	112,1	37,9

Vypočtené teploty výrobků na automatickém dopravníku pro jednotlivé simulace.

simulace	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
výrobek z pece	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]
1	120	120	120	120	120	120	120
2	112,3	112,3	112,3	112,3	112,3	112,3	112,3
3	105,3	105,3	84,9	34	105,3	84,9	34
4	98,9	98,9	79,7	33,7	98,9	79,7	33,7
5	93,1	93,1	75	33,3	93,1	75	33,3
6	87,7	87,7	70,7	33,1	87,7	70,7	33,1
7	82,8	82,8	66,8	32,8	82,8	66,8	32,8
8	78,3	78,3	63,3	32,6	78,3	63,3	32,6
9	74,2	74,2	60,2	32,3	74,2	60,2	32,3
10	70,4	70,4	57,3	32,1	70,4	57,3	32,1
11	67,0	67,0	54,7	30,2	67,0	54,7	32
12	63,8	63,8	52,4	31,8	63,8	52,4	31,8
13	61,0	61,0	50,2	31,6	61,0	50,2	31,6
14	58,3	58,3	48,3	31,5	58,3	48,3	31,5
15	55,9	55,9	46,6	31,4	55,9	46,6	31,4
16	53,7	53,7	45	31,3	53,7	45	31,3
výrobek z lakovny	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]	teplota [°C]
1	138,0	138,0	138,0	138,0	138,0	138,0	138,0
2	128,8	128,8	128,8	128,8	128,8	128,8	128,8
3	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4
4	112,7	112,7	112,7	112,7	112,7	112,7	112,7
5	105,7	105,7	105,7	105,7	105,7	105,7	105,7
7	99,2	99,2	63,8	63,8	99,2	63,8	63,8
9	93,3	93,3	58,5	58,5	93,3	58,5	58,5
10	87,9	87,9	56,1	56,1	87,9	56,1	56,1
11	83,0	83,0	54	54	83,0	54	54

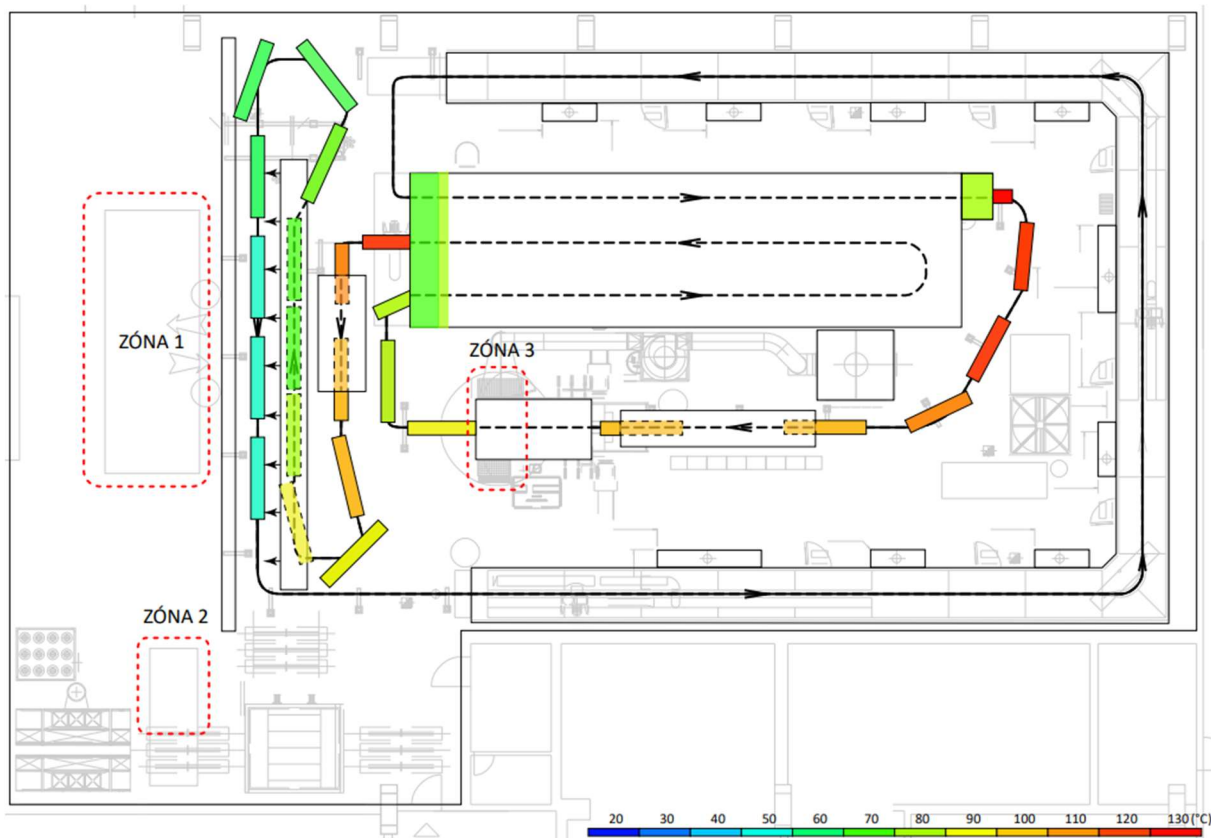
Výrobky vyjíždějící ze sušící pece mají větší teplotu než ty z vypalovací pece, Z rychlosti náhlého ochlazení jsou patrný účinky jednotlivých opatření pro snížení tepelné zátěže. V první a druhé simulaci nejsou výrobky nijak chlazeny. Třetí simulace obsahuje chlazení výrobků po sušení i vypalování pomocí zvýšené konvekce v ofukovacích boxech. Další varianta obsahuje box s vodními tryskami, které schladí výrobky po vypálení velmi prudce. Výrobky po sušení jsou chlazeny v jako předchozí

variantě – zvýšenou konvekci. Chladicí opatření se v následujících simulacích opakují. Barevně zvýrazněné řádky obsahují teploty výrobku, který sálá na pracovníky ve vyšetřovaných bodech.

B.5 Simulace

Úkolem simulací je odhadnout podmínky pracovního prostředí pro každý jeden navrhovaný stav na třech místech. V 1. zóně se navěšují a sundávají výrobky z dopravníku, následně se zde také balí, pohybuje se tu nejvíce lidí. Vyhodnocení pracoviště za pomoci WBGT indexu je realizováno v tomto místě. Zóna 2 investor nevyžaduje chladit. V zóně 3 se na výrobky nanáší prášek lakovací hmoty. Zlepšení pracovních podmínek je vítáno, nicméně nevyžadováno.

Na obrázku níže jsou vyznačeny jednotlivé pracovní zóny, jakými teplotami výrobky a nejteplejší části technologie na pracovníky sálají. V modelu je vyznačen automatický dopravník a v jakém směru na něm výrobky obíhají, jsou zobrazeny jen dílce s výrazně vyšší teplotou, než je teplota okolního prostředí.

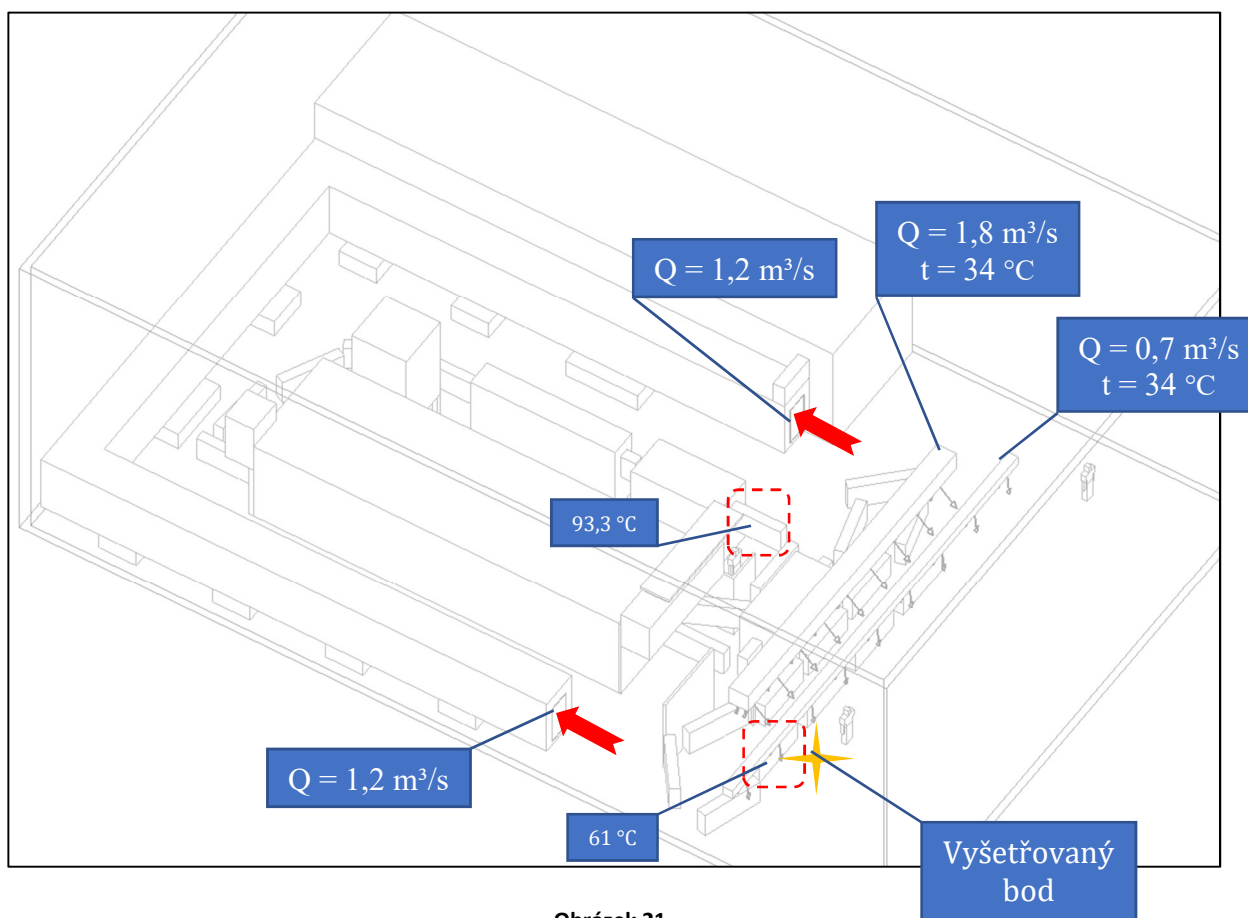


Obrázek 20

B.5.1 Simulace 1 – stávající stav s naměřenými průtoky vzduchu

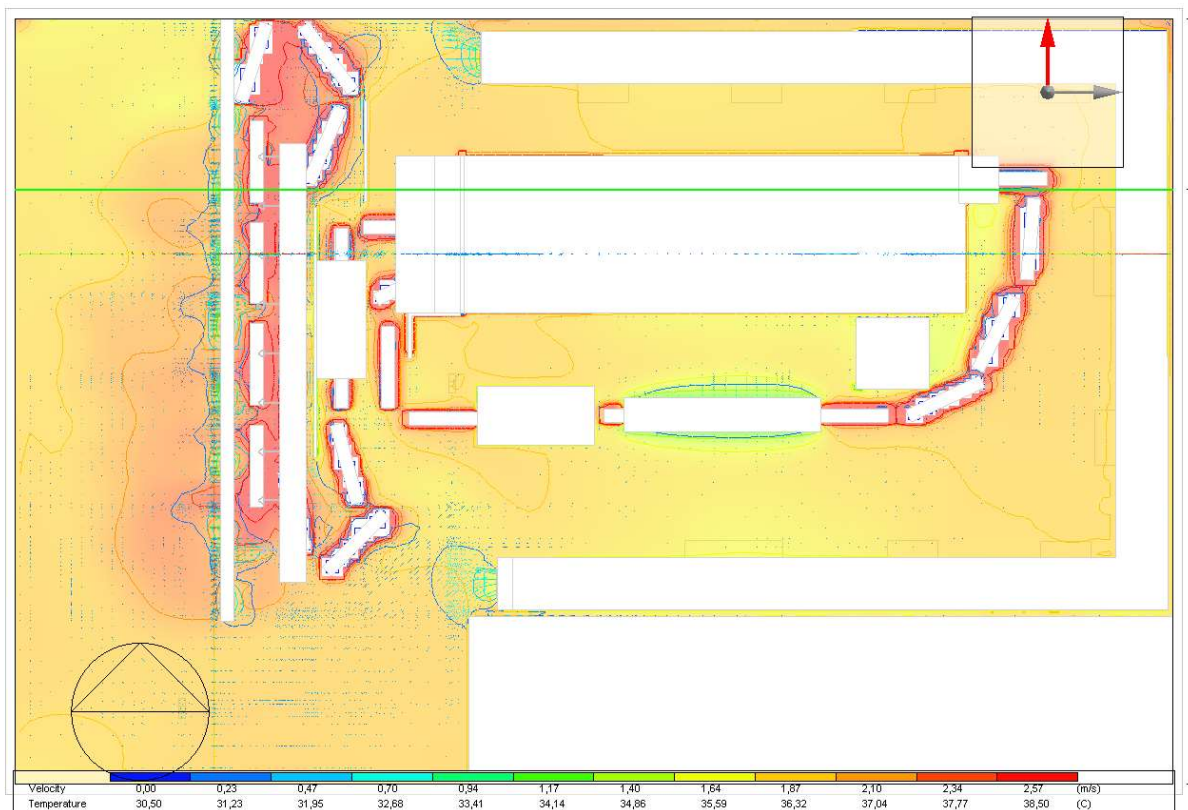
V první verzi se simulují podmínky stávajícího stavu. Je uvažován kritický letní den, kdy teplota venkovního vzduchu dosahuje 34 °C. Ke stanovení teploty výrobků je uvažována rychlost proudění vzduchu po celé hale 0,2 m/s, odtud součinitel přestupu tepla $\alpha = 6,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Z naměřených hodnot rychlosti proudění vzduchu po délce textilního potrubí a ploch perforací byl stanoven průtok vzduchu. Větší textilní rukáv přivádí vzduch nepřetržitě, menší rukáv se zapíná podle potřeby. Jelikož uvažujeme kritický stav, v simulaci budou přivádět vzduch obě dvě větve.

přívod vzduchu:	$t_{př} [^{\circ}\text{C}]$	$Q_v [\text{l/s}]$	$Q_{v\text{výustka}}$
stálé VZT	34	1755	65
přídavné VZT	34	720	40
odvod vzduchu:			
chemickou linkou		2475	1237,5
sálající výrobky:	$t_{zóna1} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{zóna3} [^{\circ}\text{C}]$	
	61	93,3	



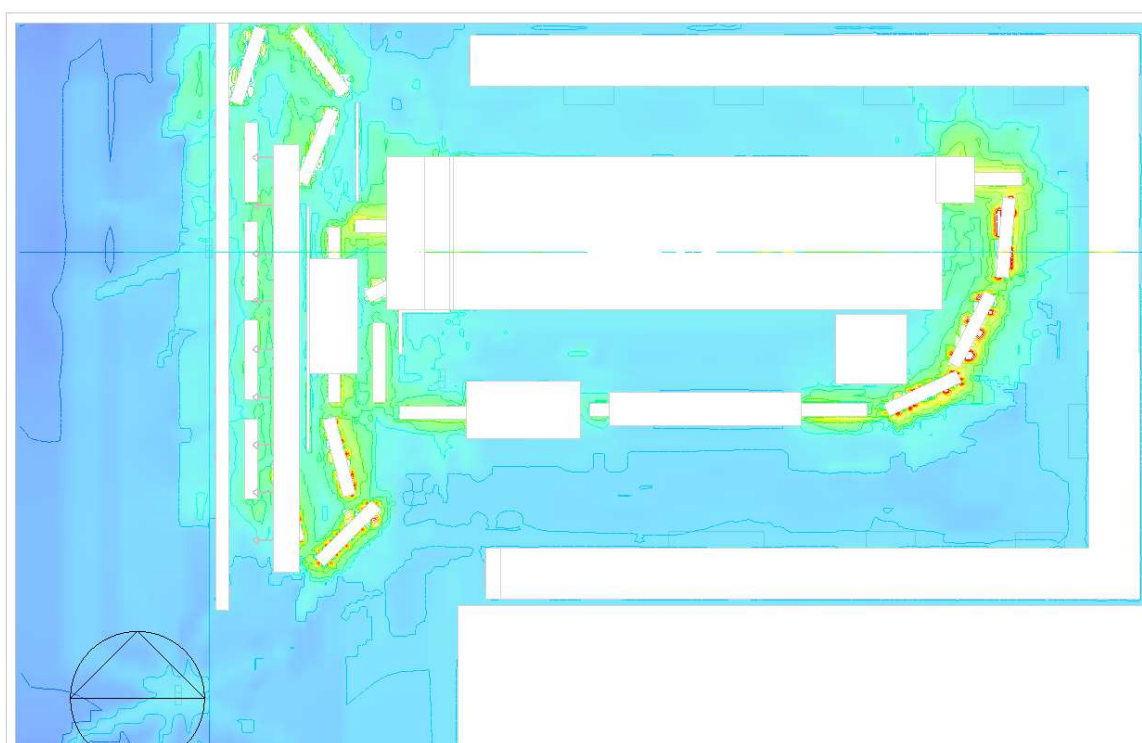
Obrázek 21

Výsledek 1. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



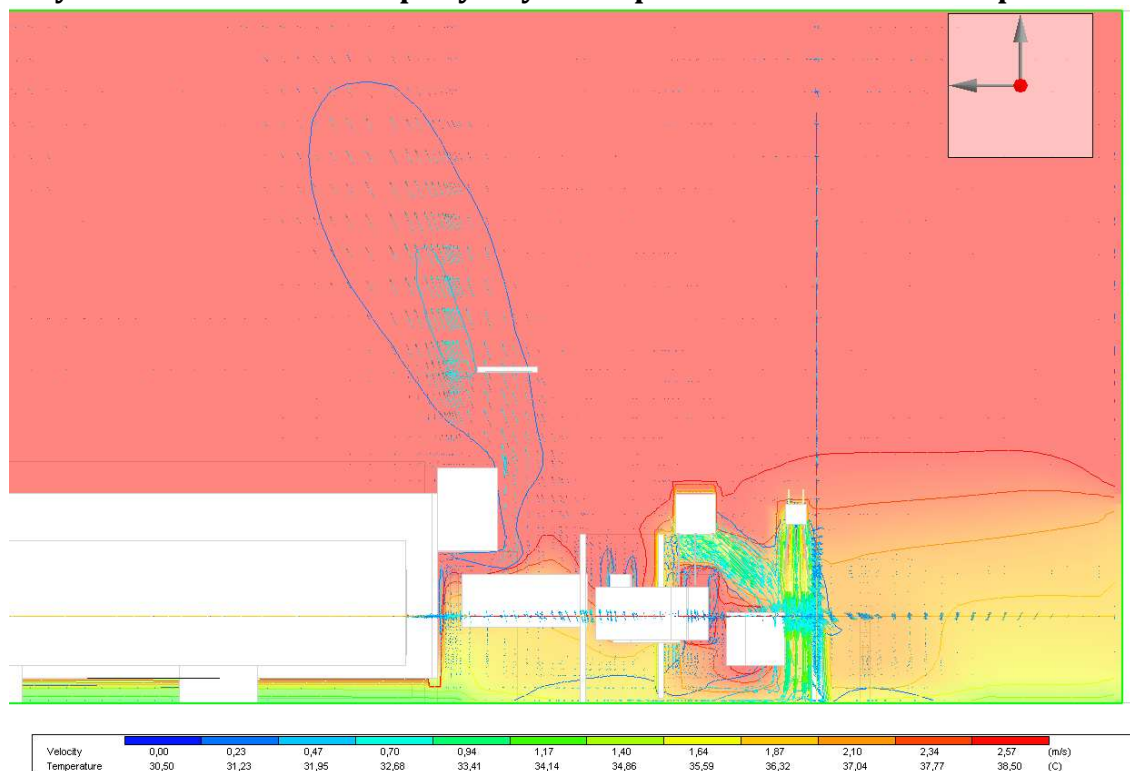
Obrázek 22

Výsledek 1. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



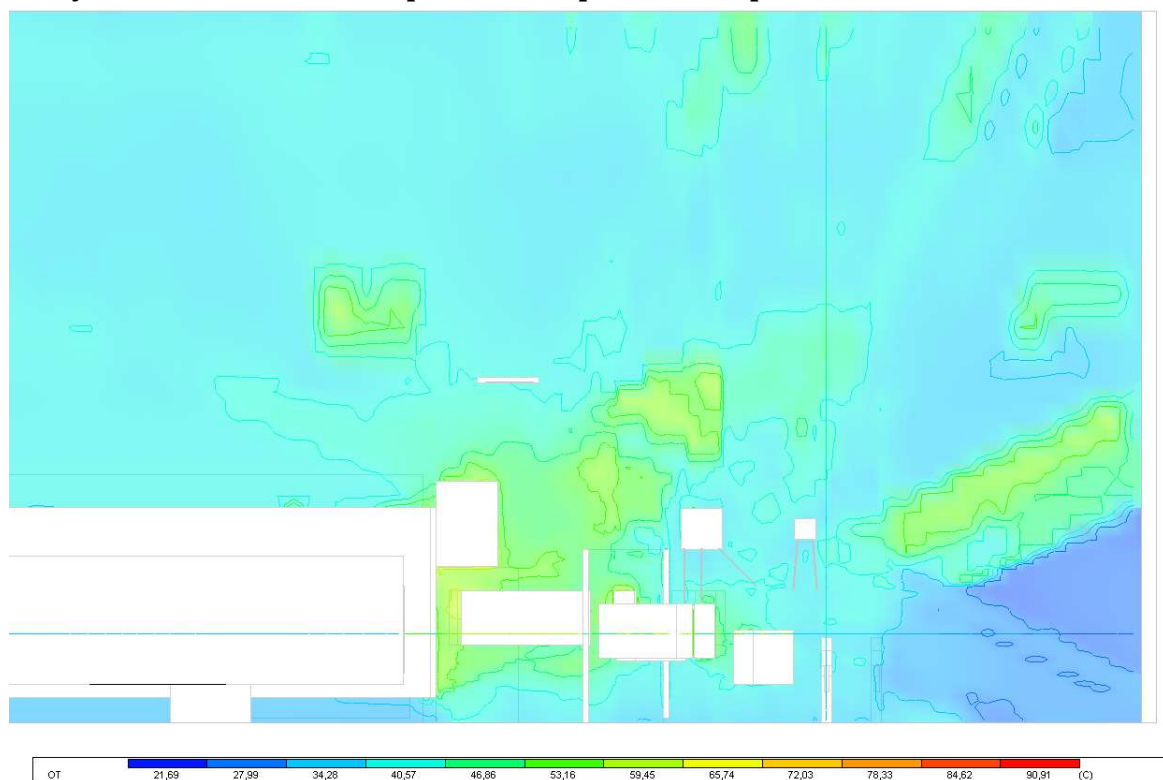
Obrázek 23

Výsledek 1. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 24

Výsledek 1. simulace – operativní teplota boční pohled

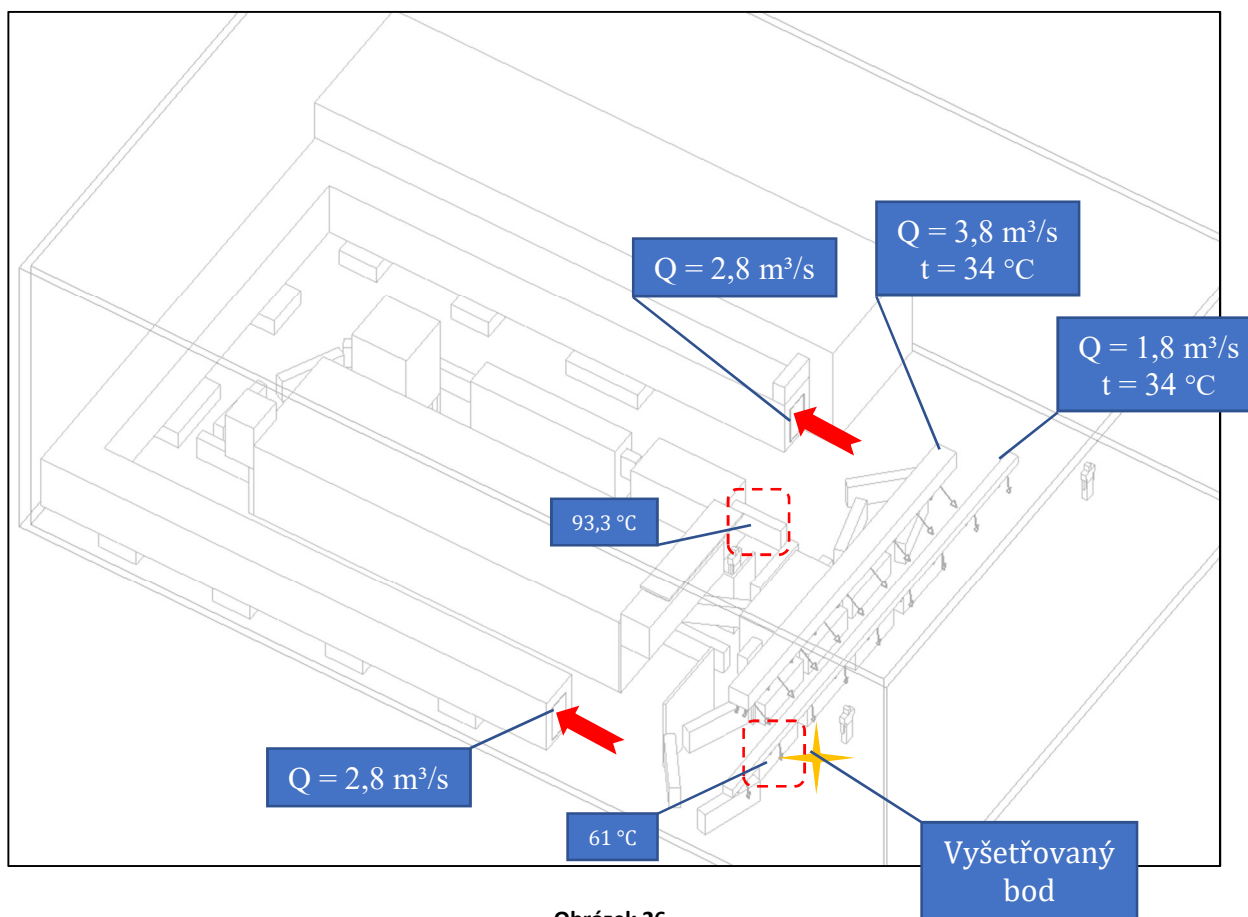


Obrázek 25

B.5.2 Simulace 2 – stávající stav s průtoky vzduchu dle specifikací ventilátorů

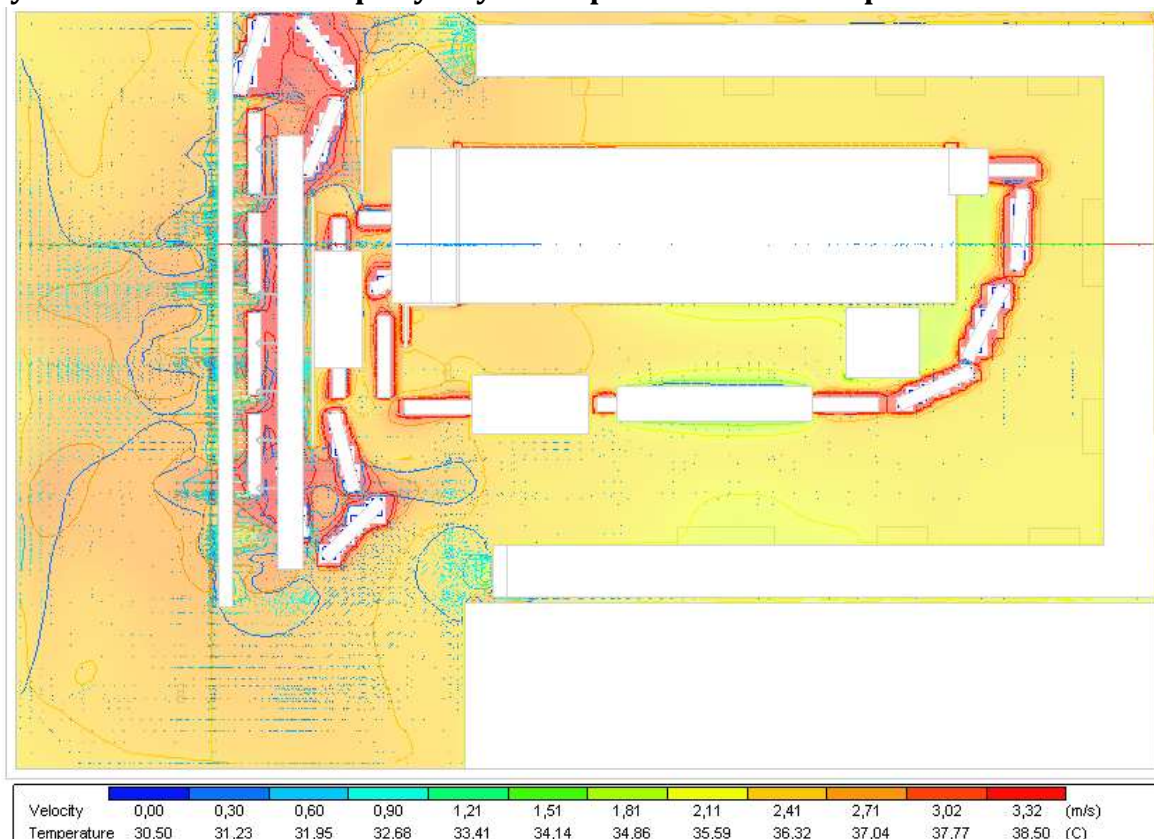
V druhé verzi se simulují podmínky stávajícího stavu. Stejně jako v předchozí variantě je uvažován kritický letní den, kdy teplota venkovního vzduchu dosahuje 34 °C. Ke stanovení teploty výrobků je uvažována rychlost proudění vzduchu po celé hale 0,2 m/s, odtud součinitel přestupu tepla $\alpha = 6,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Průtoky vzduchu jsou stanoveny dle specifikací výrobců ventilátorů. Jedná se o stav se kterým investor počítal.

přívod vzduchu:	$t_{př} [^{\circ}\text{C}]$	$Q_v [\text{l/s}]$	$Q_{Vvystka}$
stálé VZT	34	3780	140
přídavné VZT	34	1890	105
odvod vzduchu:			
chemickou linkou		5670	2835
sálající výrobky:	$t_{zóna1} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{zóna3} [^{\circ}\text{C}]$	
	61	93,3	



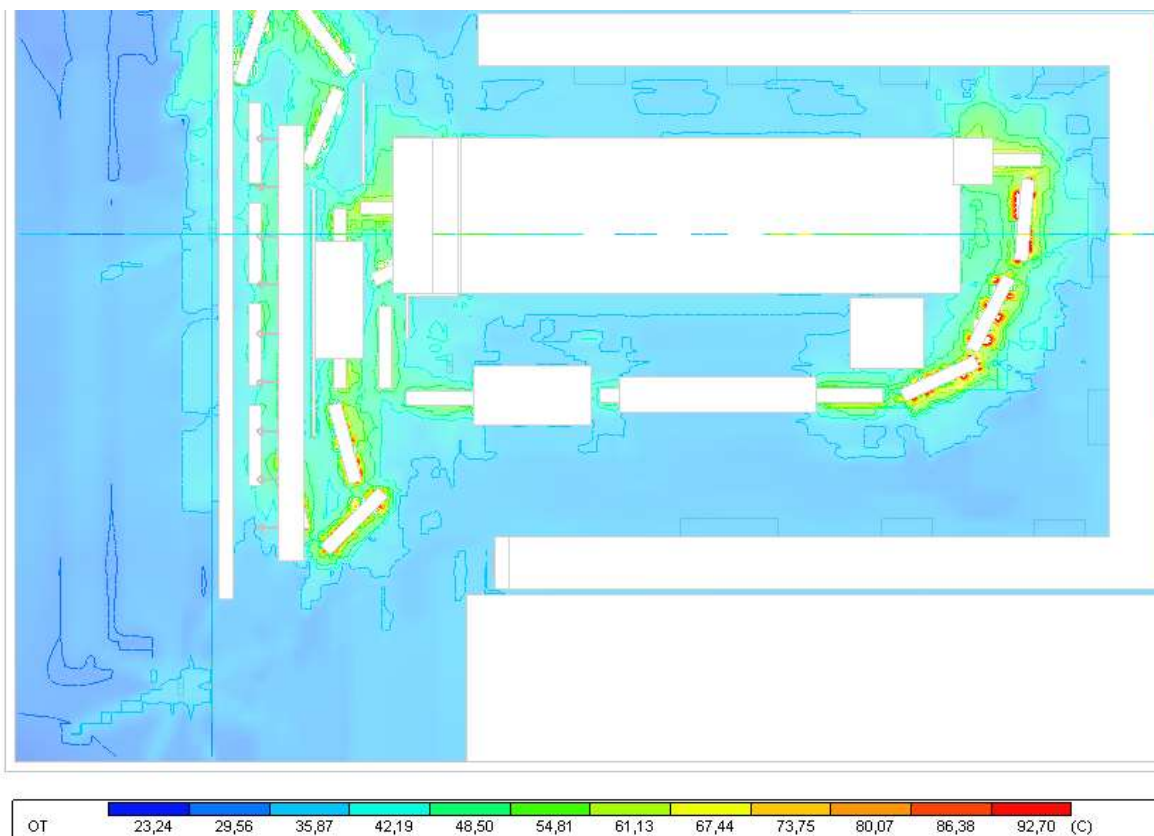
Obrázek 26

Výsledek 2. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



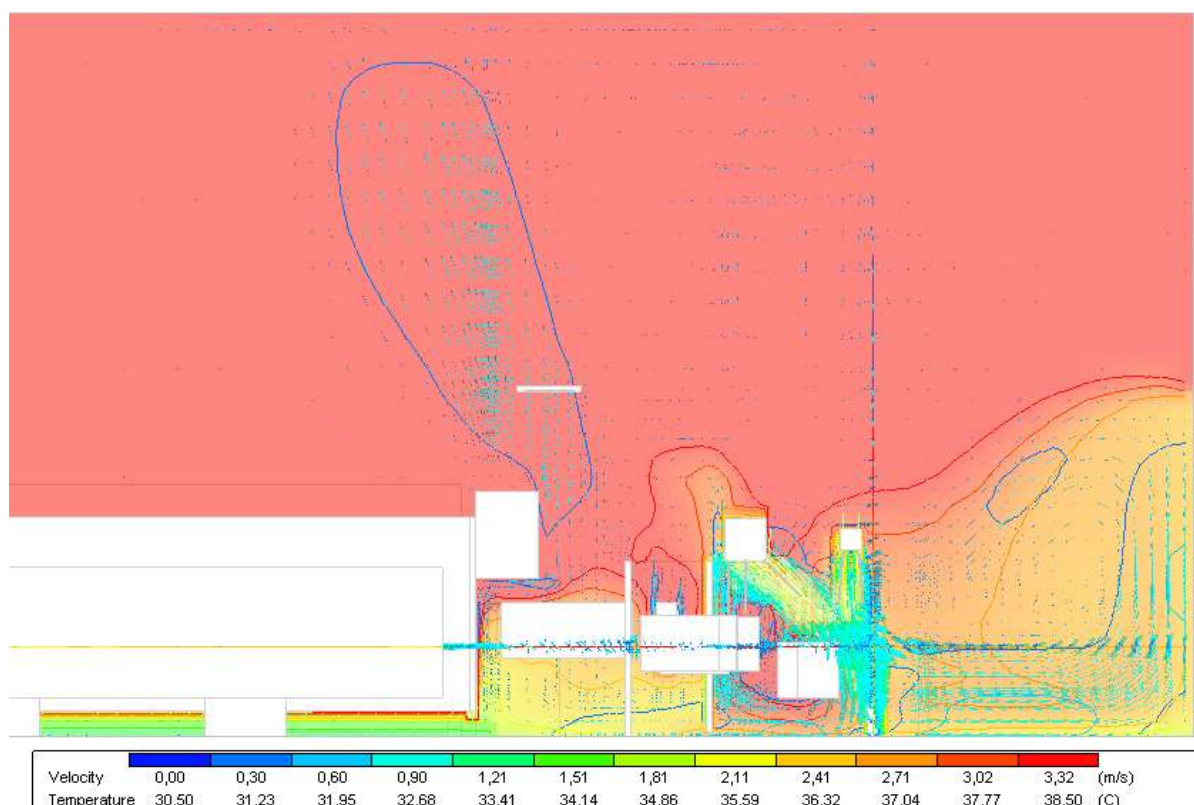
Výsledek 2. simulace – operativní teplota pohled z vrchu

Obrázek 27



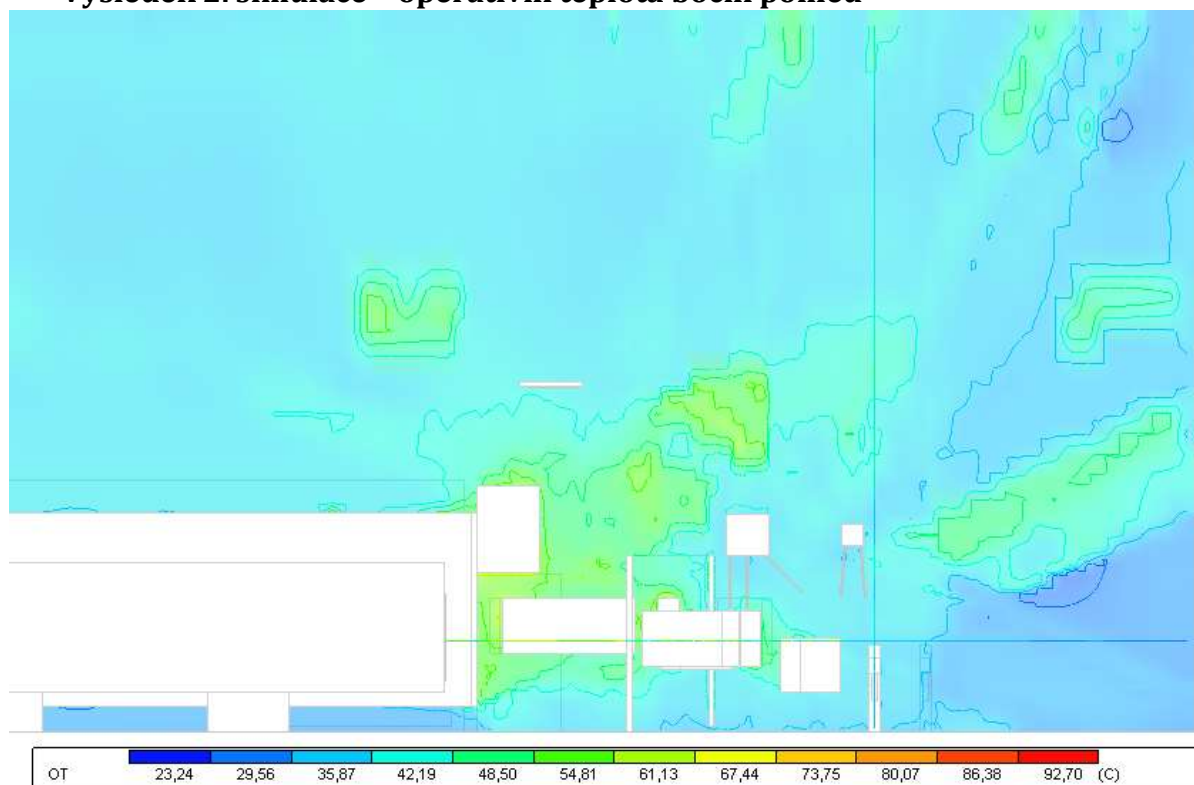
Obrázek 28

Výsledek 2. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 29

Výsledek 2. simulace – operativní teplota boční pohled

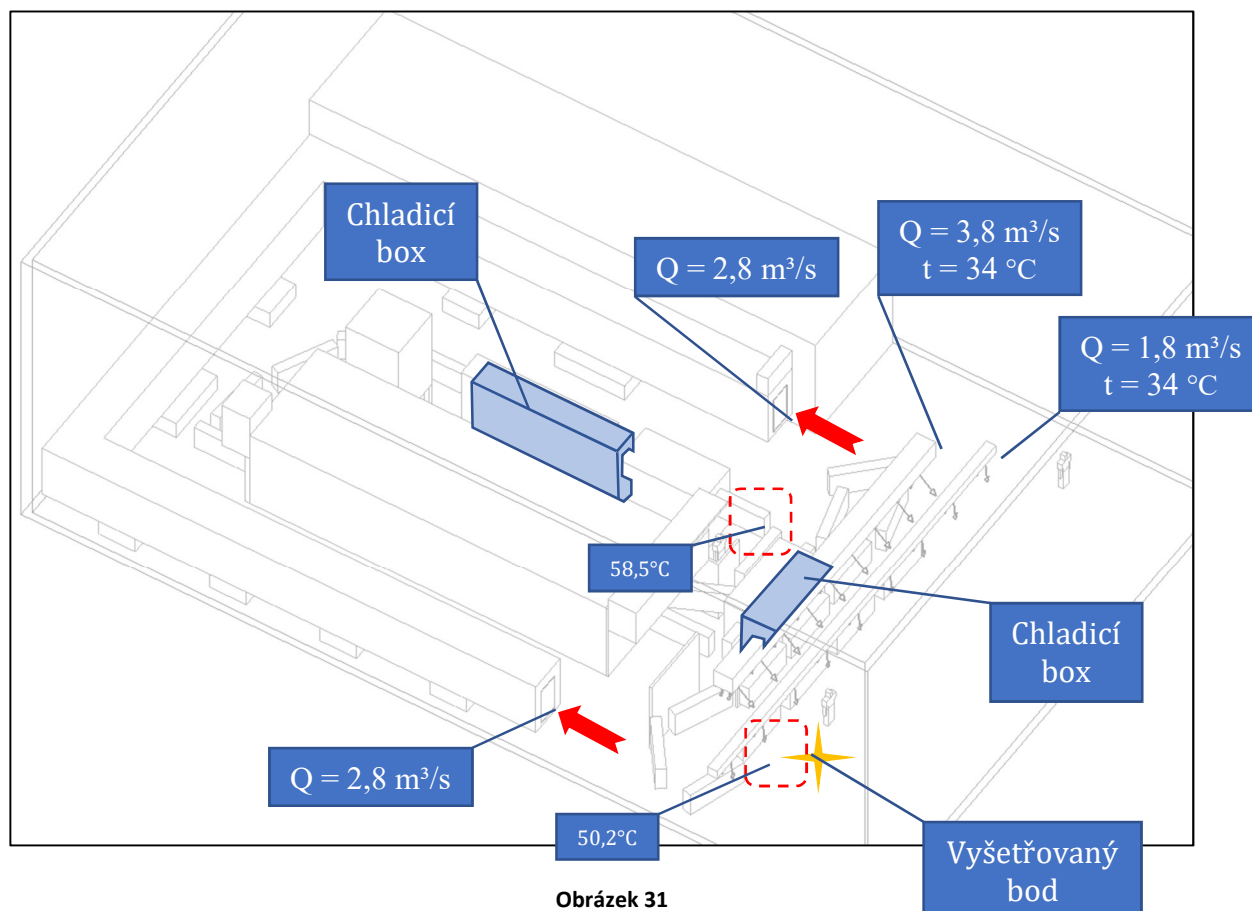


Obrázek 30

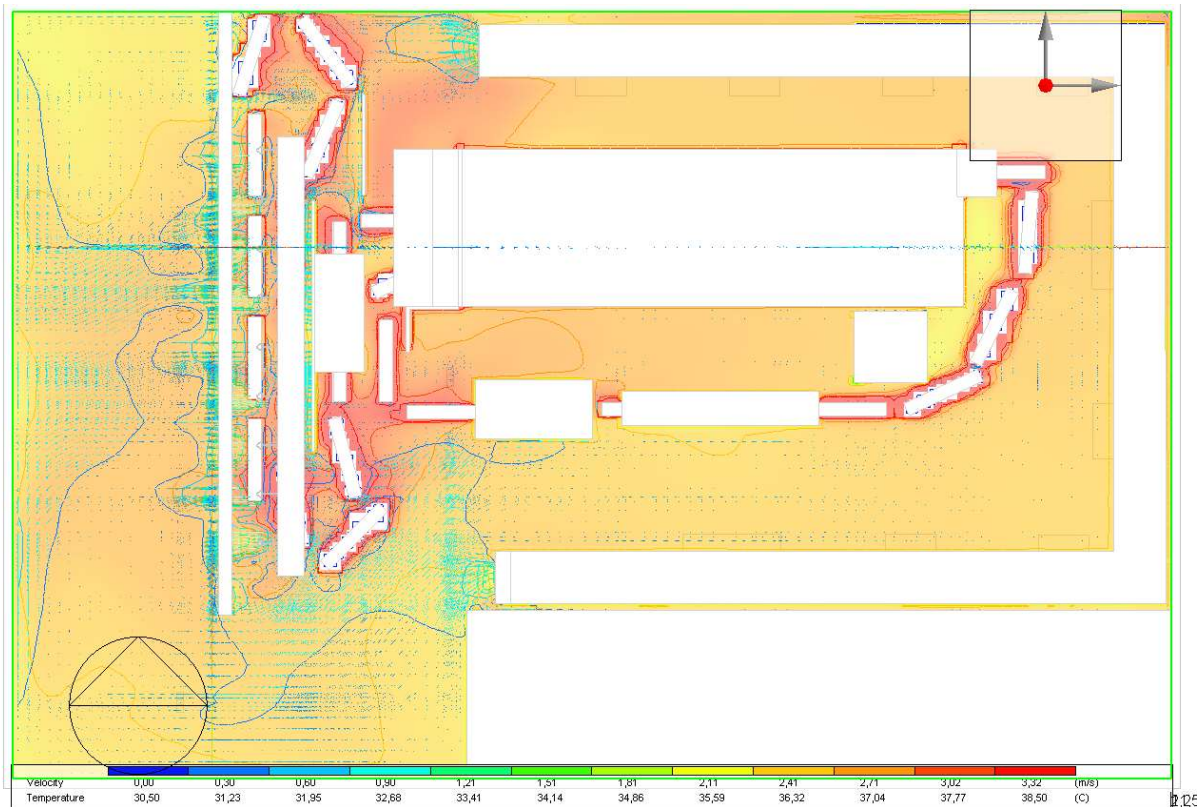
B.5.3 Simulace – 3 konvektivní chlazení výrobků

V této simulaci jsou aktivní chladicí boxy výrobků. Teploty výrobků jsou nastaveny tak, že v prostoru haly chladnou při $\alpha = 6,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, v úsecích chladicích boxů, kde kolem výrobků proudí tepelně neupravený vzduch rychlostí 6 m/s , je $\alpha = 29,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Chladicí boxy mají svůj vlastní přívod a odvod vzduchu, v modelu proto neovlivňují proudění vzduchu v hale. Ofukování je umístěno za sušící pecí, před lakováním a poté za vypalovací pecí, před sundáváním výrobků z dopravníku. Venkovní okrajové podmínky jsou stejné jako při stávajícím stavu, Hodnoty přiváděného a odváděného vzduchu také.

přívod vzduchu:	$t_{př} [^{\circ}\text{C}]$	$Q_v [\text{l/s}]$	$Q_{v\text{výstka}}$
stálé VZT	34	3780	140
přídavné VZT	34	1890	105
odvod vzduchu:			
chemickou linkou		5670	2835
sálající výrobky:	$t_{zóna1} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{zóna3} [^{\circ}\text{C}]$	
	50,2	58,5	
chladicí box:	$v [\text{m/s}]$	$L [\text{m}]$	$\alpha [\text{W/m}^2\text{K}]$
po sušení	6	6	29,13
po vypálení	6	3	29,13

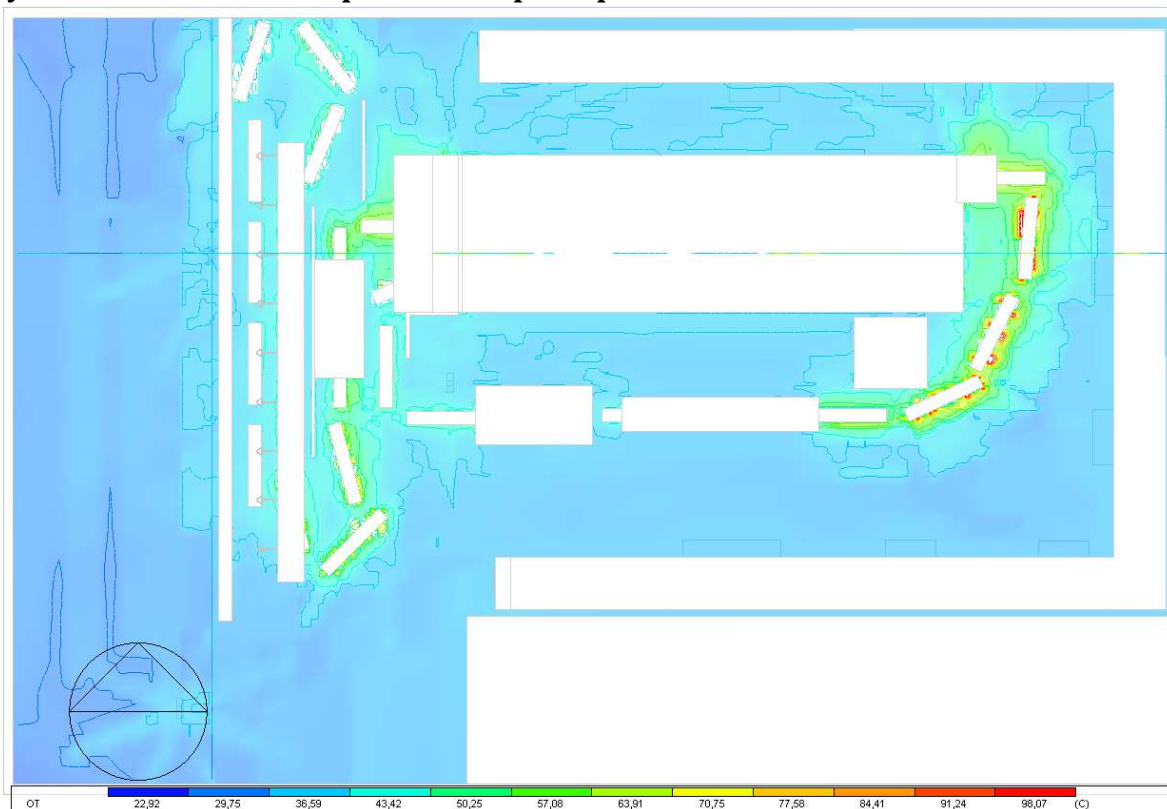


Výsledek 3. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



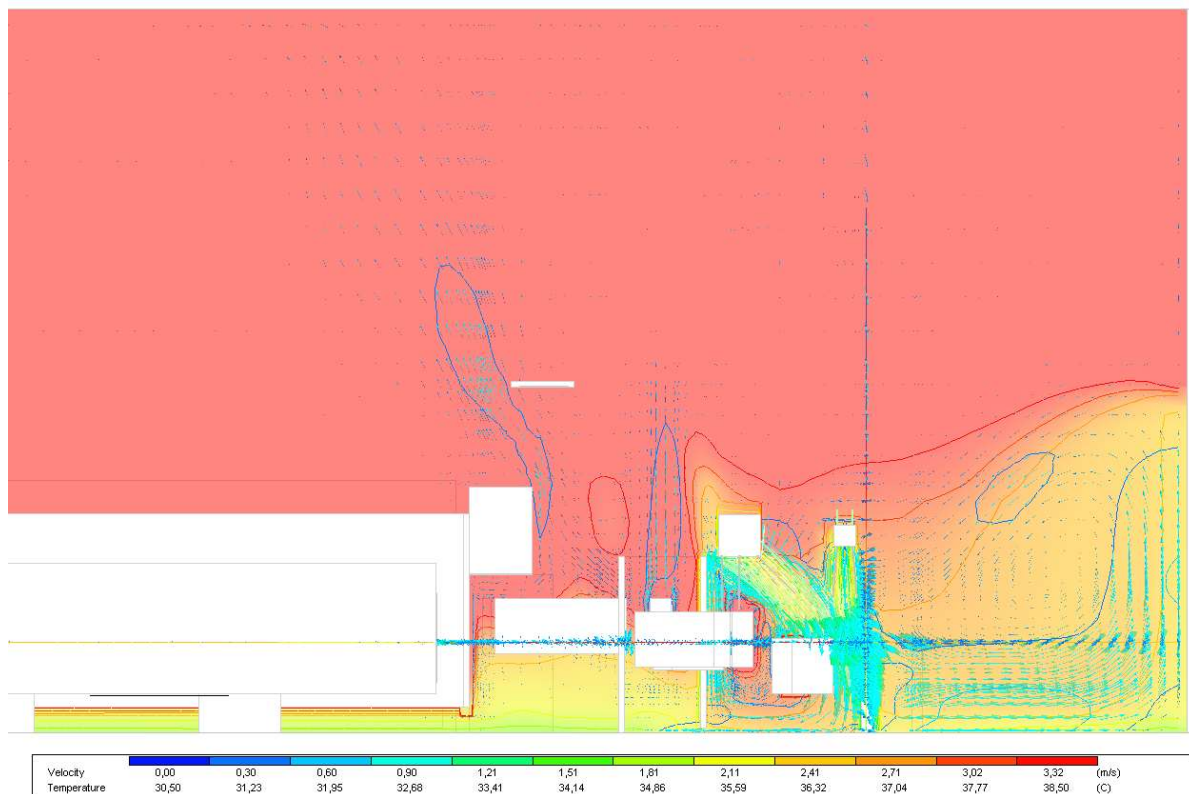
Obrázek 32

Výsledek 3. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



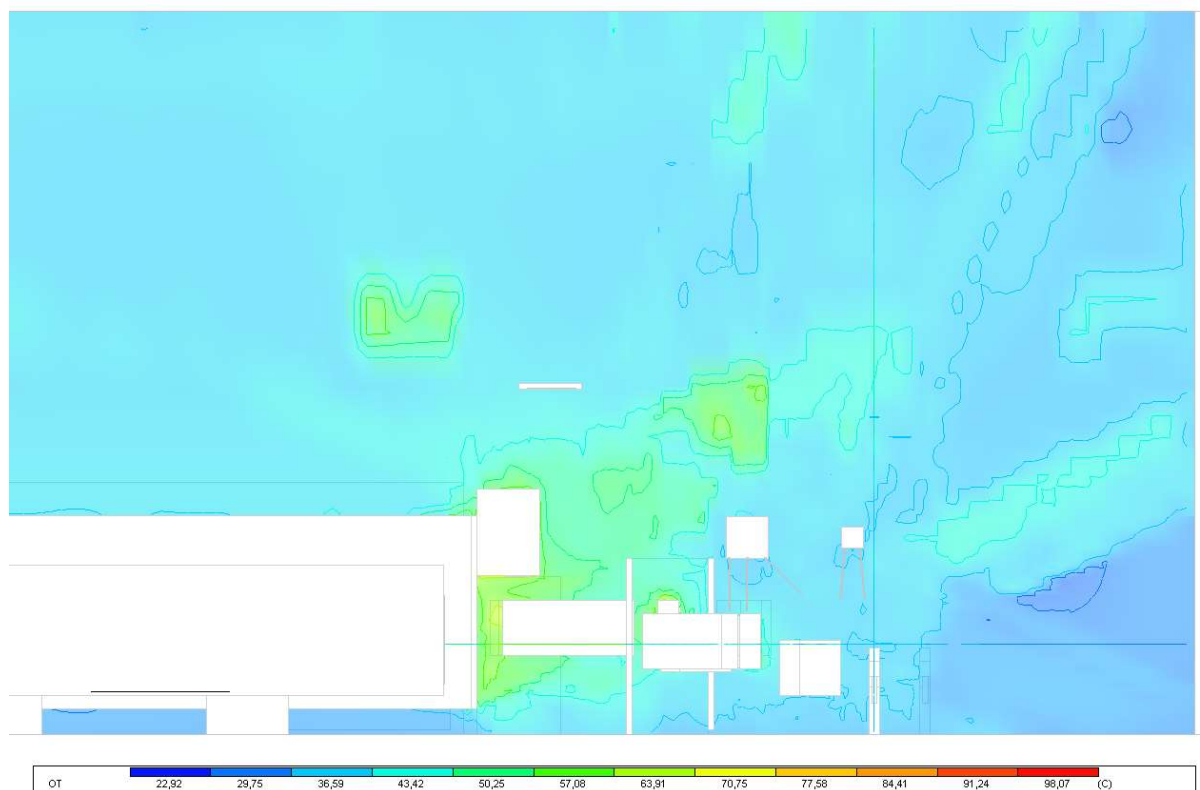
Obrázek 33

Výsledek 3. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 34

Výsledek 3. simulace – operativní teplota boční pohled



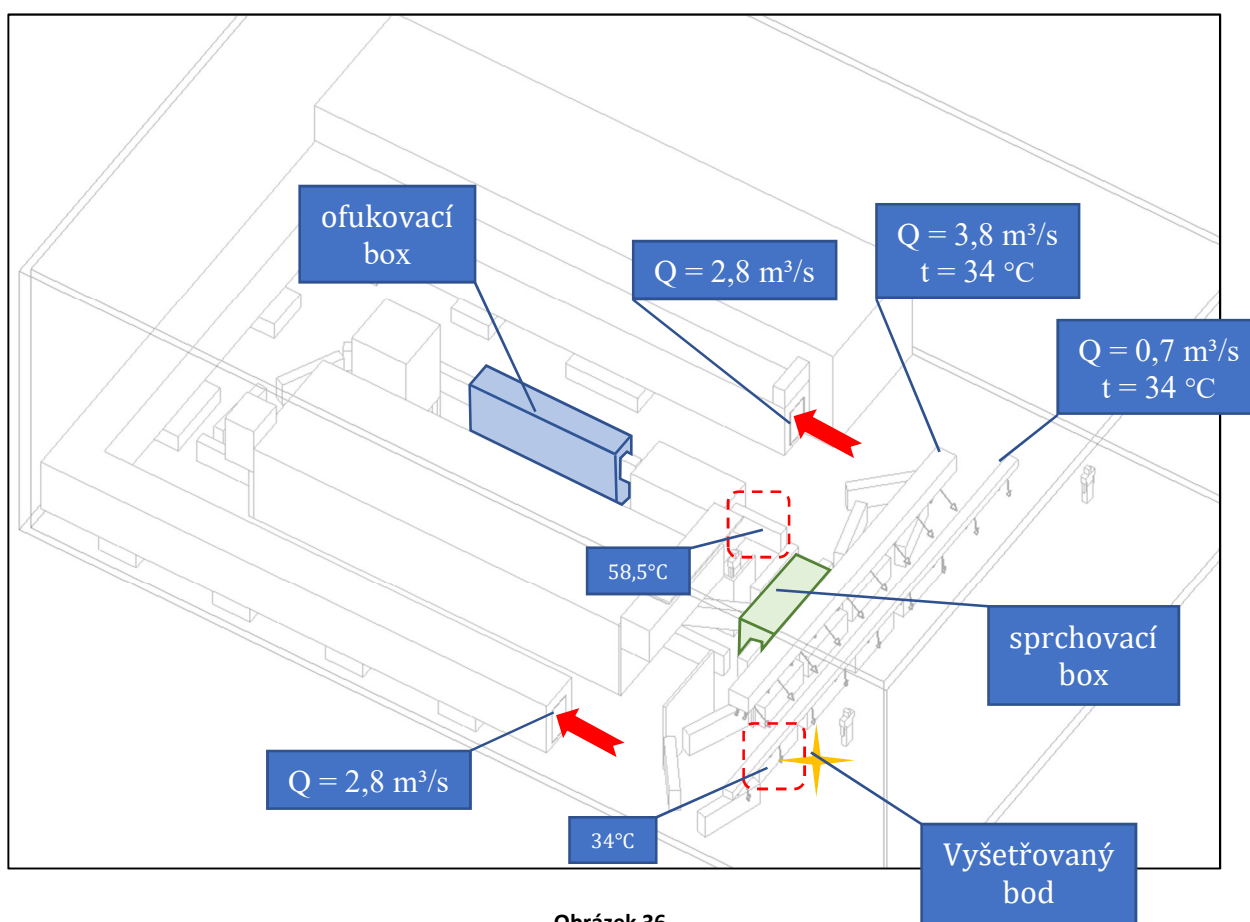
Obrázek 35

B.5.4 Simulace – 4 adiabatické a konvektivní chlazení výrobků

Technologie lakování výrobků dovoluje drastické snížení výrobků hned po vypálení. Proto bylo možné uvažovat tuto variantu, kdy je snížení teploty výrobků, v boxu za vypalováním, dosaženo adiabatickým chlazením. Chladicí box po sušení tento způsob chlazení používat nemůže, jelikož technologie lakování si žádá suché výrobky. Adiabaticky chladicí box byl uvažován následovně. Na výrobky se na začátku boxu nanáší pomocí trysek voda, ta spotřebuje na fázovou změnu obrovské množství tepla. Chladicí box má svůj vlastní odvod vzduchu, který udržuje v boxu malý podtlak, který nedovolí vzniklé vlhkosti ovlivňovat vlhkost prostředí haly. Teploty výrobků jsou nastaveny tak, že v úseku adiabatického boxu je $\alpha = 228,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ofukování je umístěno za sušící pecí, před lakováním, box se sprchováním vodou za vypalovací pecí, před sundáváním výrobků z dopravníku. Venkovní okrajové podmínky jsou stejné jako při stávajícím stavu, Hodnoty přiváděného a odváděného vzduchu také.

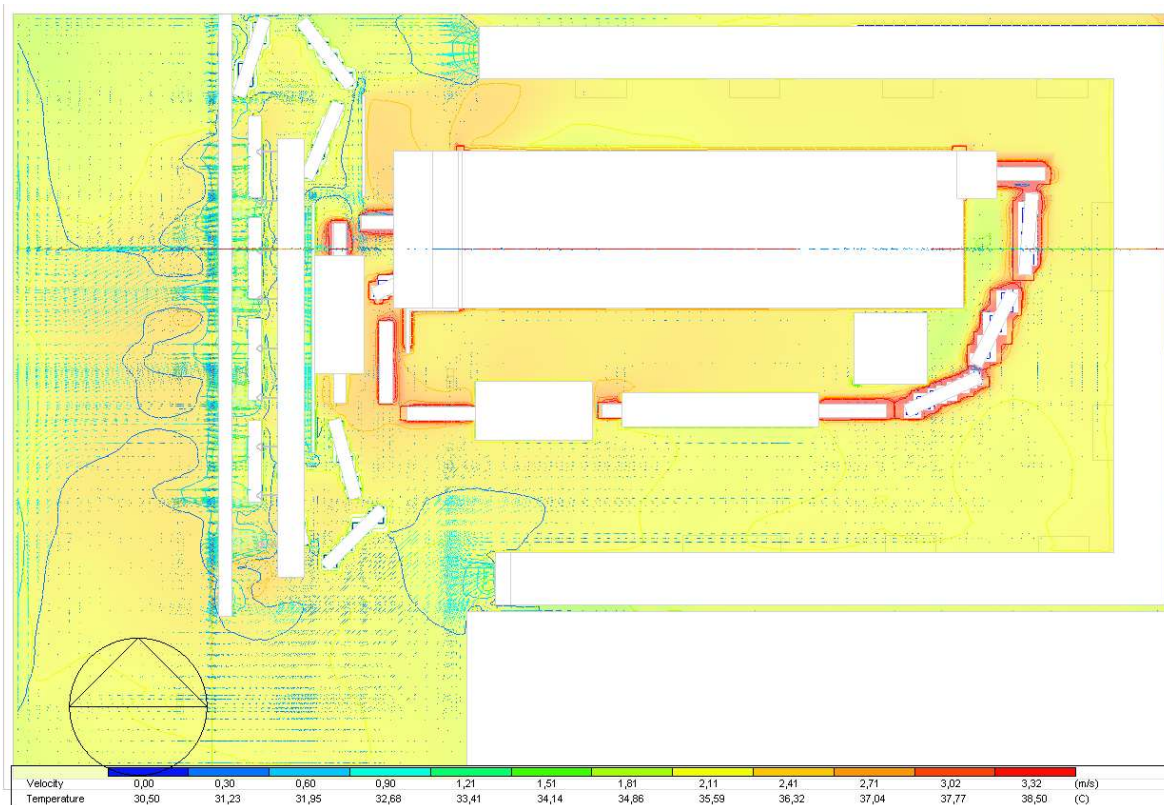
Simulace – 4 adiabatické a konvektivní chlazení výrobků

přívod vzduchu:	tr̄ [°C]	Qv [l/s]	Qv _{výstka}
stálé VZT	34	3780	140
přídavné VZT	34	1890	105
odvod vzduchu:			
chemickou linkou		5670	2835
sálající výrobky:	t _{zóna1} [°C]	t _{zóna3} [°C]	
	34	58,5	
chladicí box:	v [m/s]	L [m]	α [W/m²K]
po sušení	6	6	29,13
po vypálení	-	3	228,77



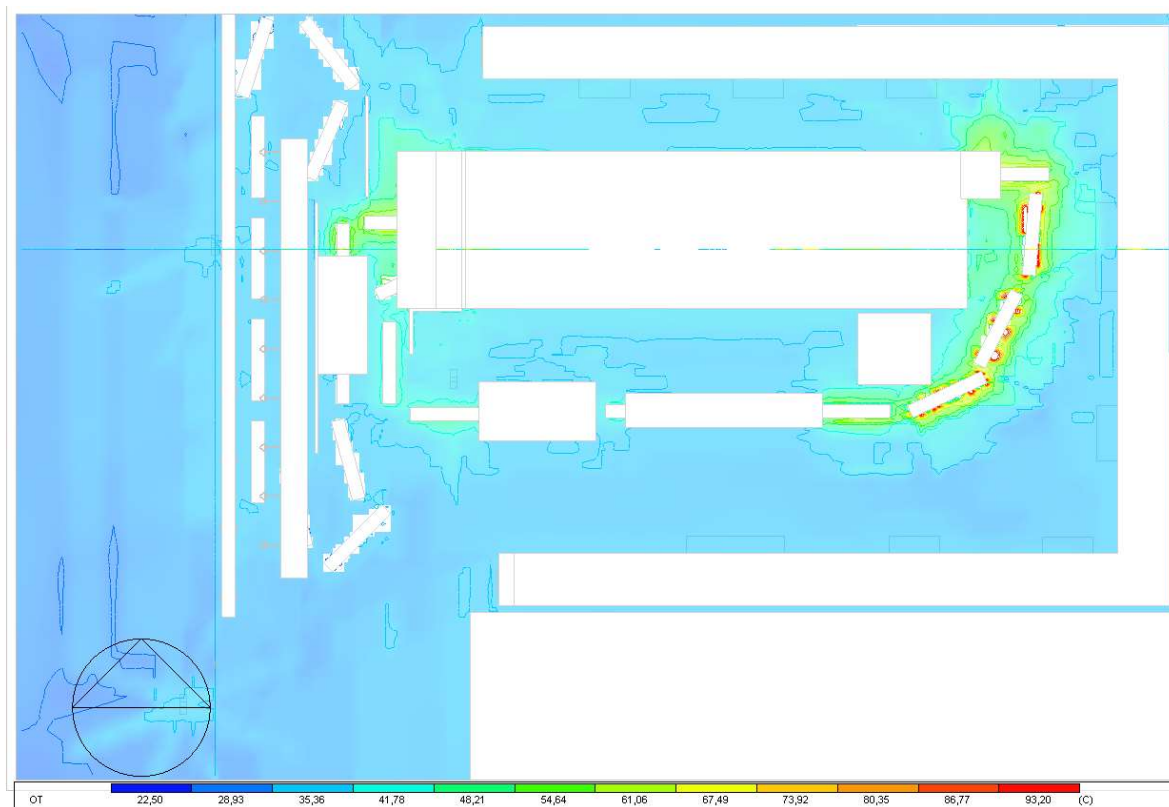
Obrázek 36

Výsledek 4. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



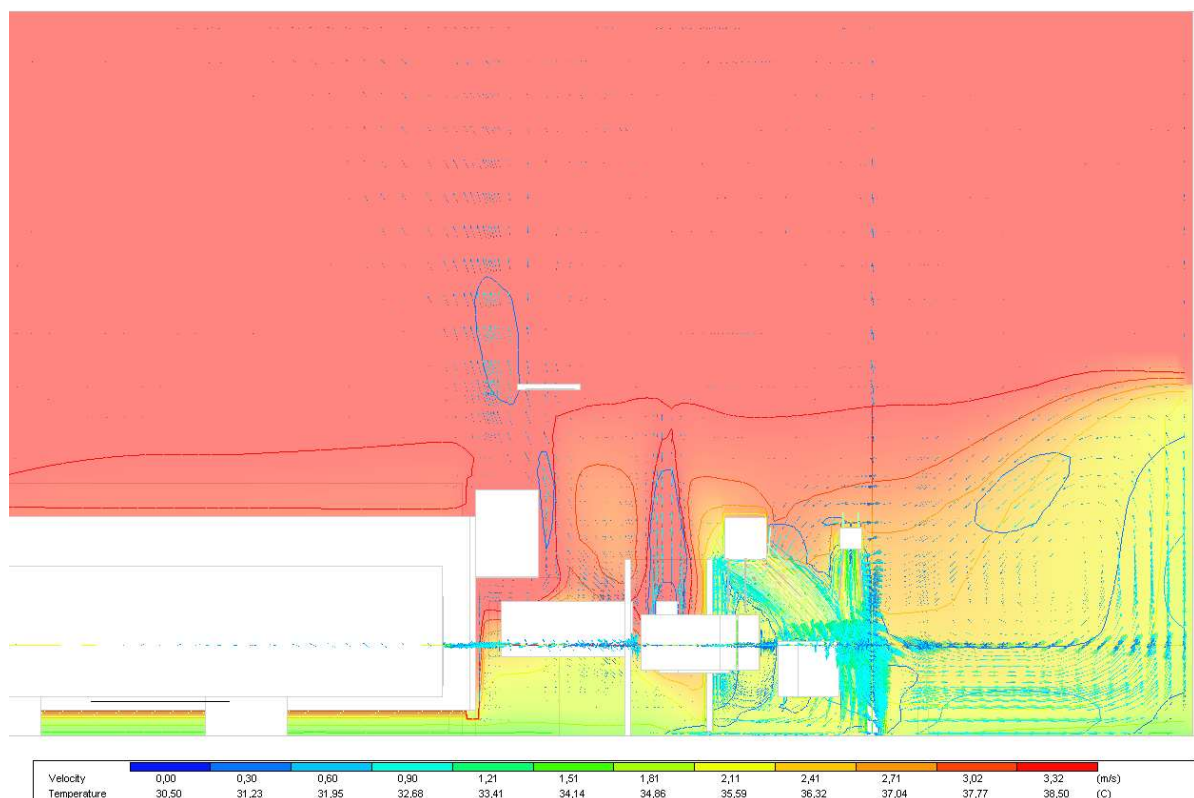
Obrázek 37

Výsledek 4. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



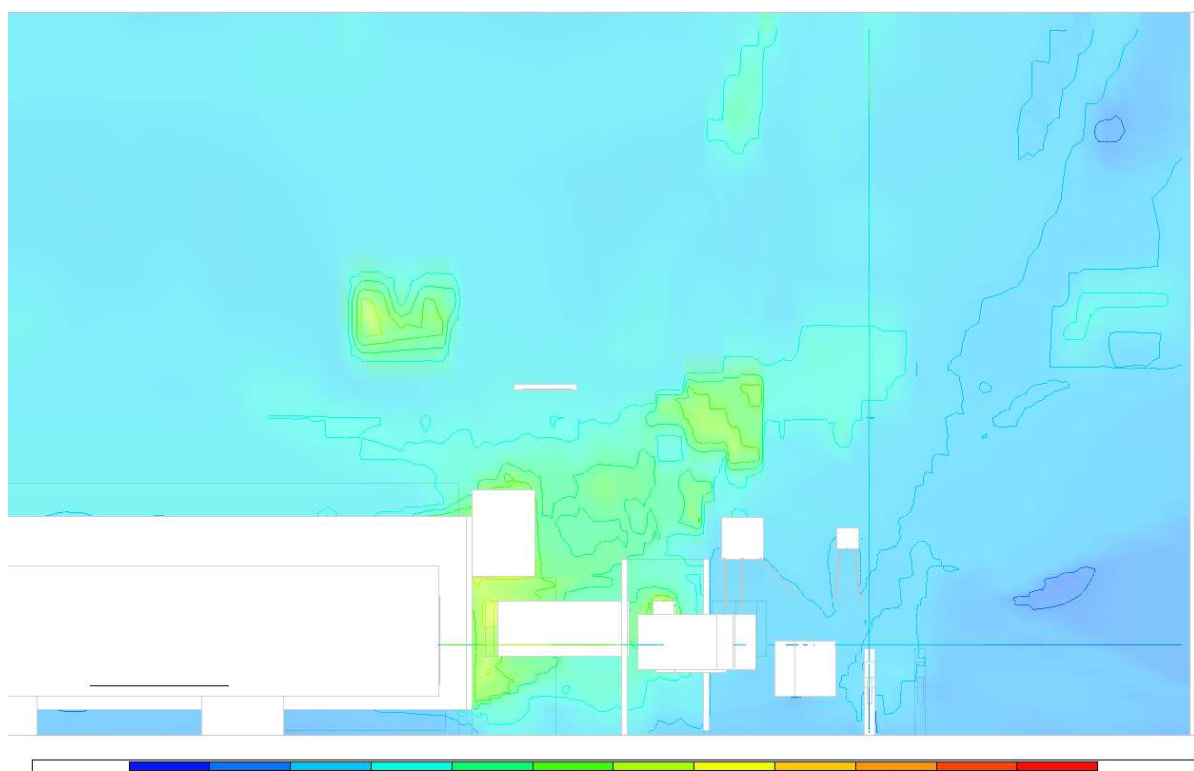
Obrázek 38

Výsledek 4. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 39

Výsledek 4. simulace – operativní teplota boční pohled

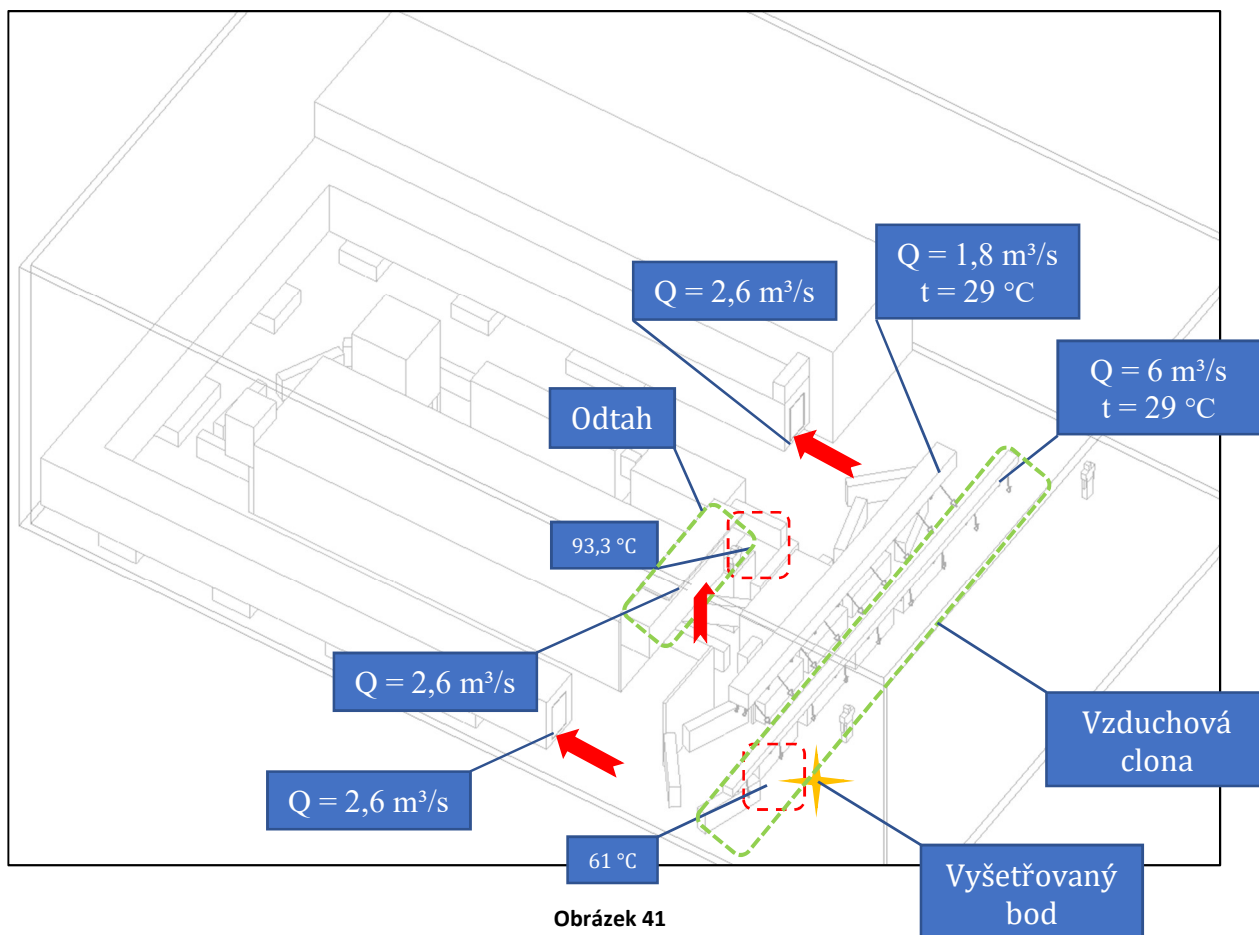


Obrázek 40

B.5.5 Simulace – 5 konvektivní chlazení pracovníků

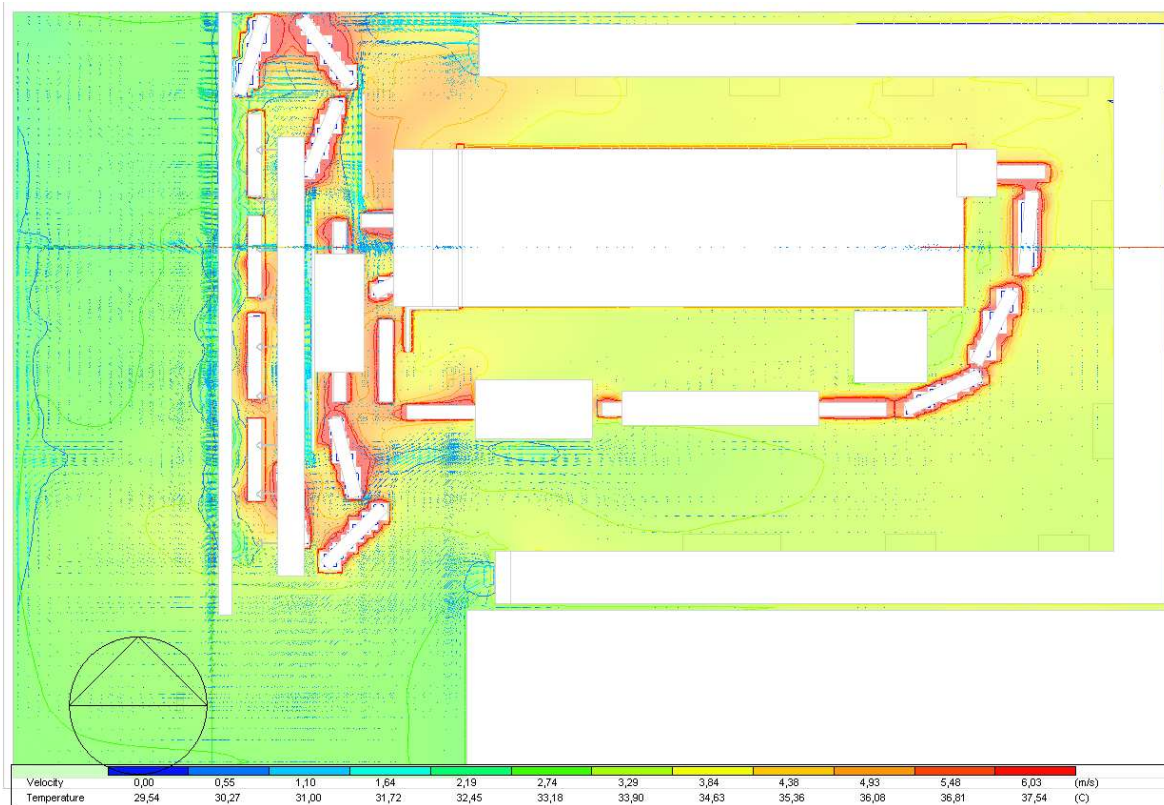
V této verzi se simulují podmínky prostředí vzniklé instalací vzduchové clony k zóně 1, tak aby zvýšila konvektivní přenos tepla z povrchů těl pracovníků. Vzduchová clona je z hranatého potrubí s průběžnými šterbinovými vyústky (80x800 mm) a průtoky přiváděného vzduchu jsou nastaveny tak, aby rychlost vzduchu, v úrovni hlavy pracovníků, nepřekračovala hodnotu 3 m/s. Nová vyústka nahrazuje menší přídatný textilní rukáv. Vzduch vháněný clonou je adiabaticky ochlazen o 5 °C, stejně tak v druhé textilní vyústce. Pro odvedení navýšených průtoků vzduchu se instaluje nad čelo pece odtah, který odvádí, tok teplého vzduchu viditelný v předchozích simulacích. Výrobky chladnou stejnou rychlostí, jako je uvažováno v původním stavu.

přívod vzduchu:	$t_{př}$ [°C]	Q_v [l/s]	$Q_{vvyústka}$
stálé VZT	29	1755	65
vzduchová clona	29	6000	400
odvod vzduchu:			
odtahem nad pecí		2585	2585
chemickou linkou		5170	2585
sálající výrobky:	$t_{zóna1}$ [°C]	$t_{zóna3}$ [°C]	
	61	93,3	



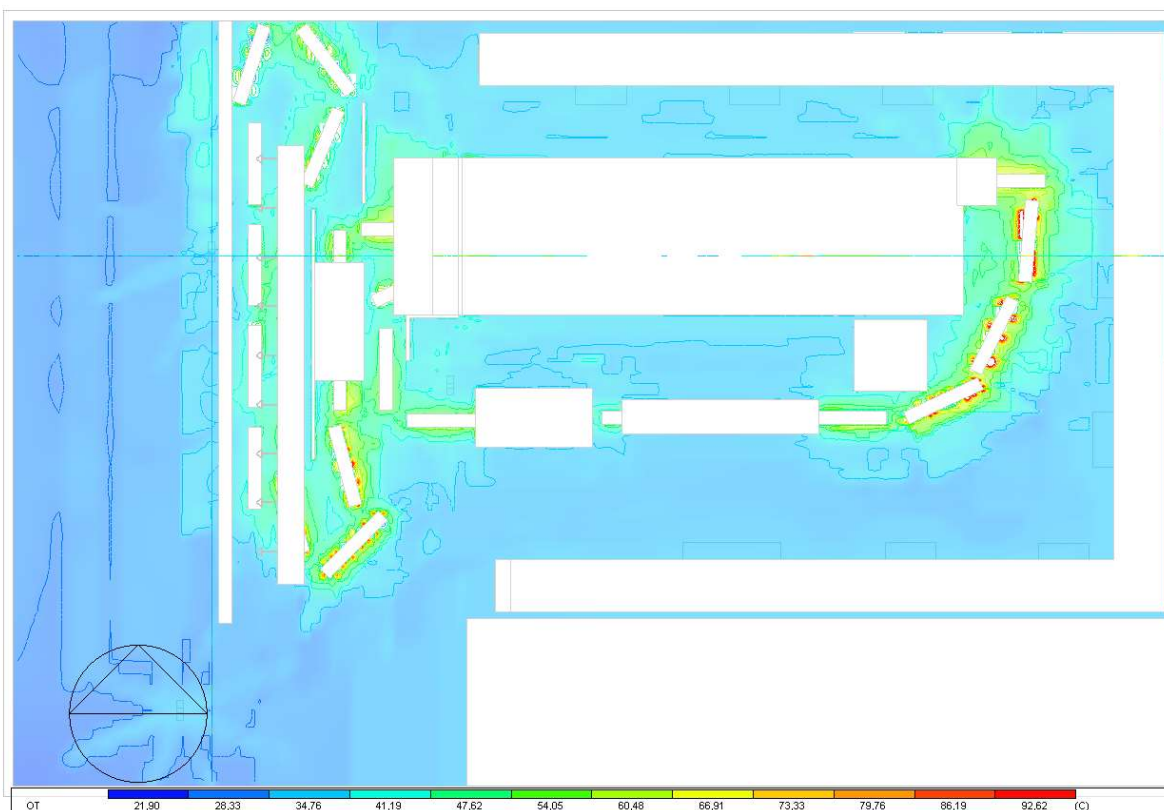
Obrázek 41

Výsledek 5. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



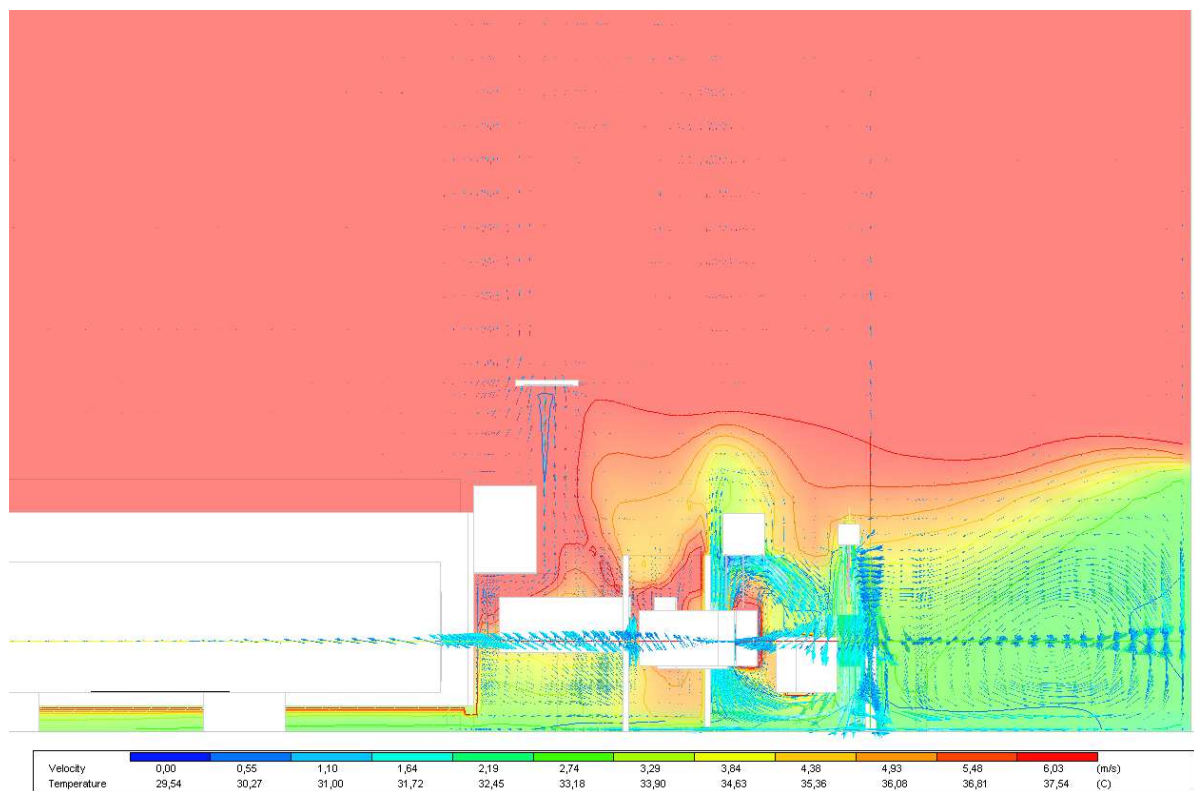
Obrázek 42

Výsledek 5. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



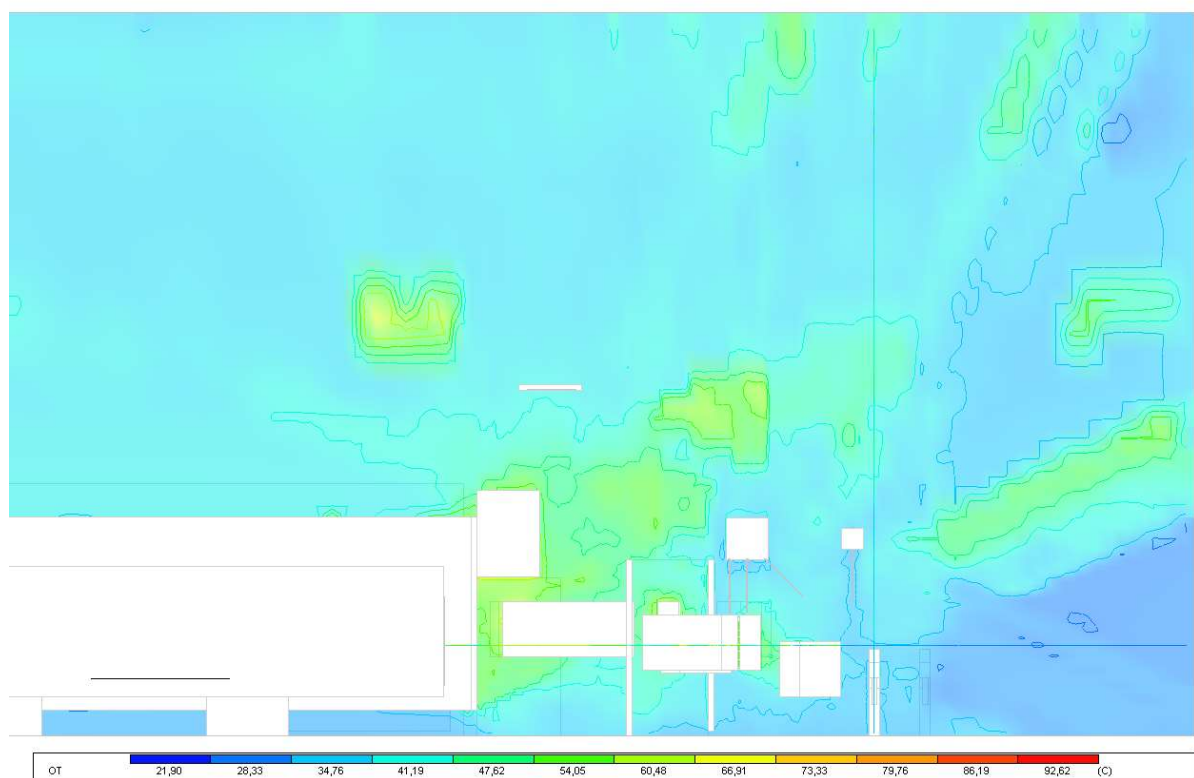
Obrázek 43

Výsledek 5. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 44

Výsledek 5. simulace – operativní teplota boční pohled

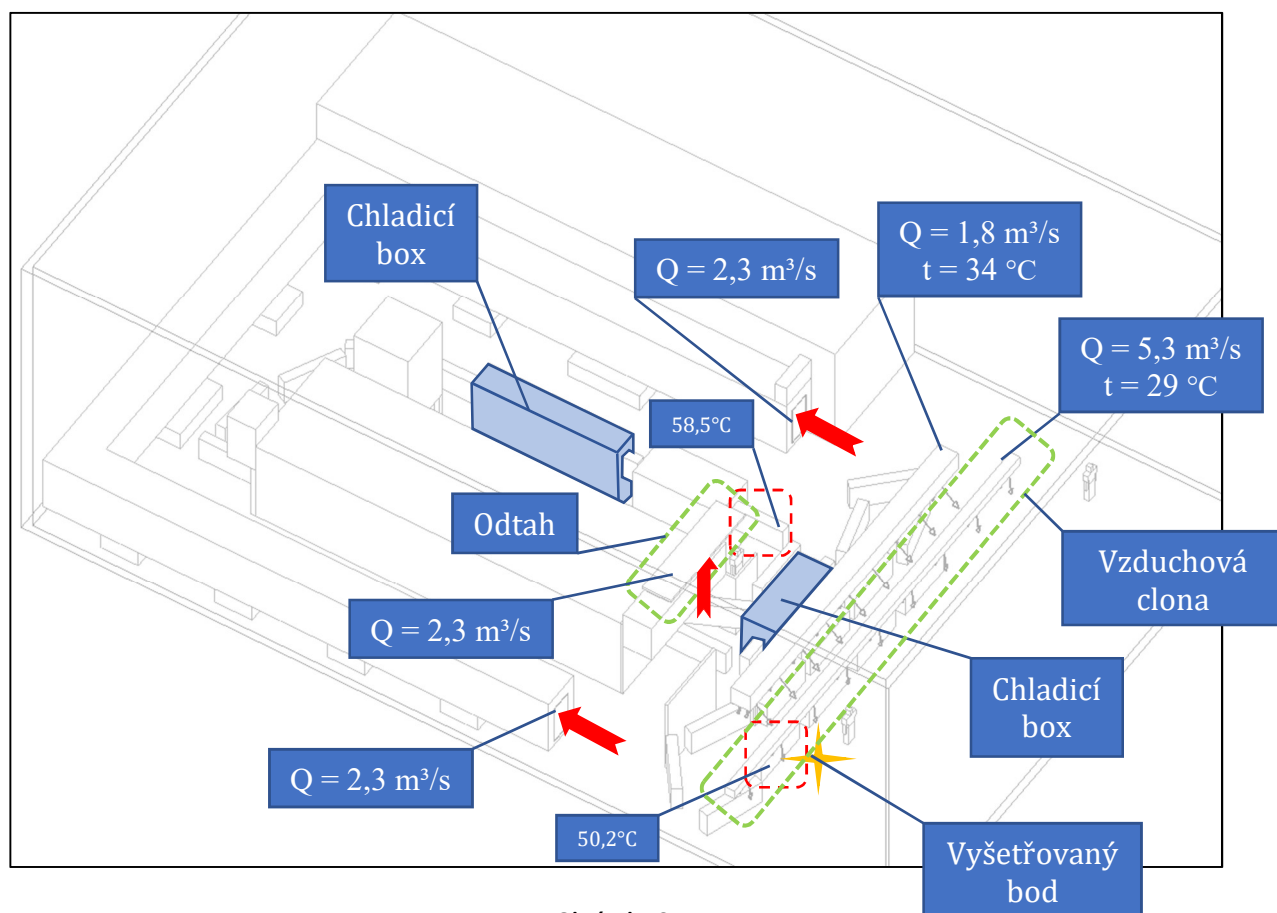


Obrázek 45

B.5.6 Simulace – 6 konvektivní chlazení výrobků a pracovníků

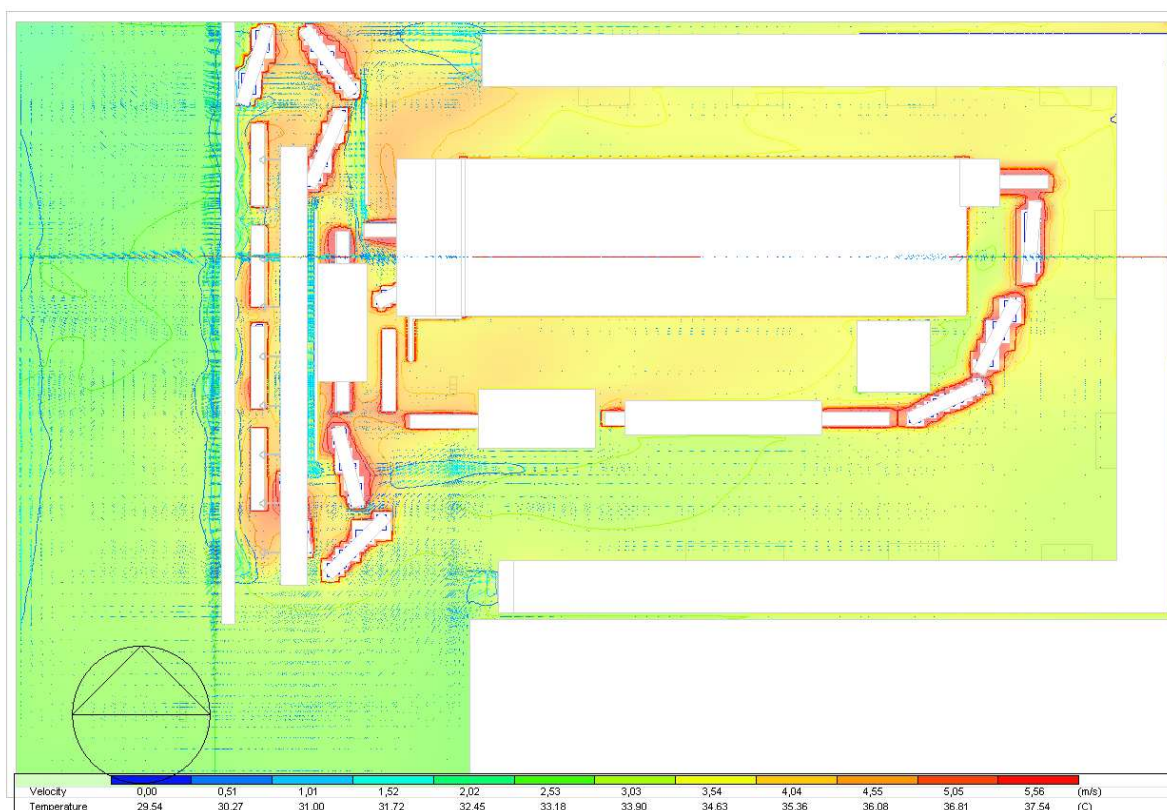
Tato simulace kombinuje opatření použitá ve variantách 3 a 5, tedy ofukování výrobků ve dvou chladicích boxech: po sušení a po vypálení. Narozdíl od předchozí simulace se zde vzduch přiváděný starou textilní vyústkou neochlazuje.

přívod vzduchu:	t_{pr} [°C]	Q_v [l/s]	$Q_{Vvystka}$
stálé VZT	34	1755	65
vzduchová clona	29	5250	350
odvod vzduchu:			
odtahem nad pecí		2335	2335
chemickou linkou		4670	2335
sálající výrobky:	$t_{zóna1}$ [°C]	$t_{zóna3}$ [°C]	
	50,2	58,5	
chladicí box:	v [m/s]	L [m]	α [W/m²K]
po sušení	5	6	29,13
po vypálení	6	3	29,13



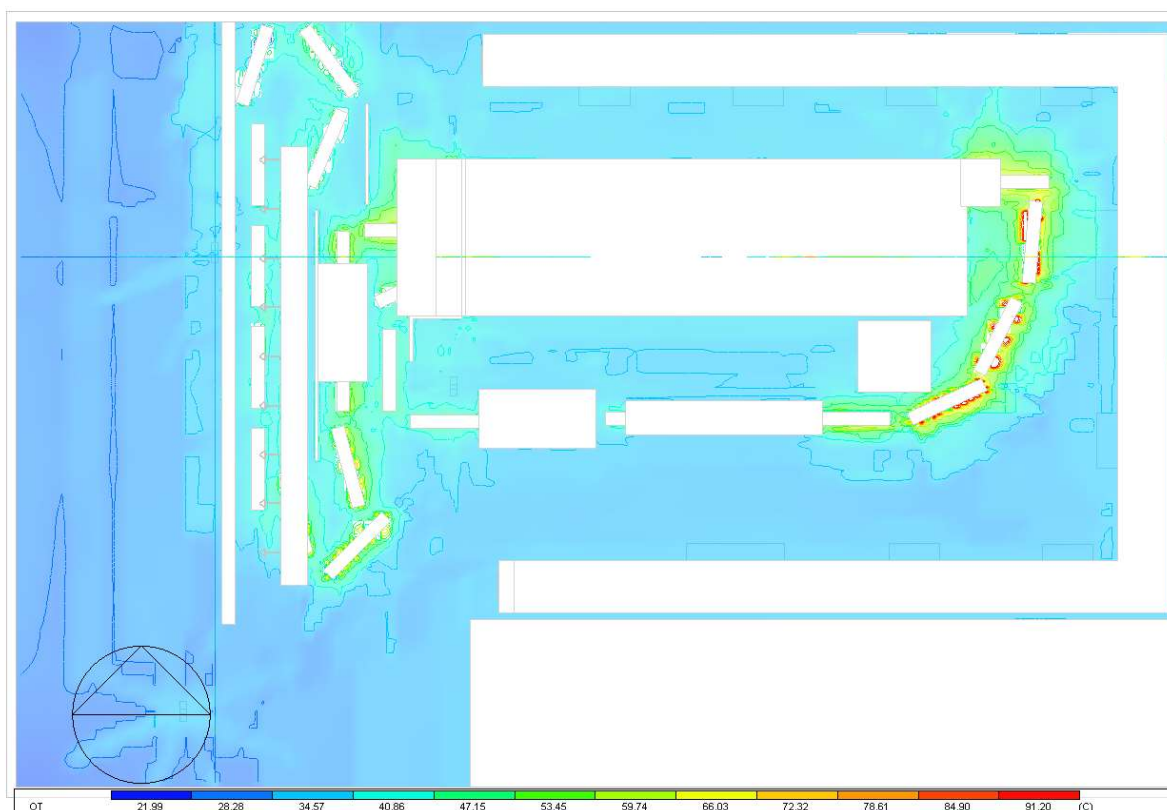
Obrázek 46

Výsledek 6. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



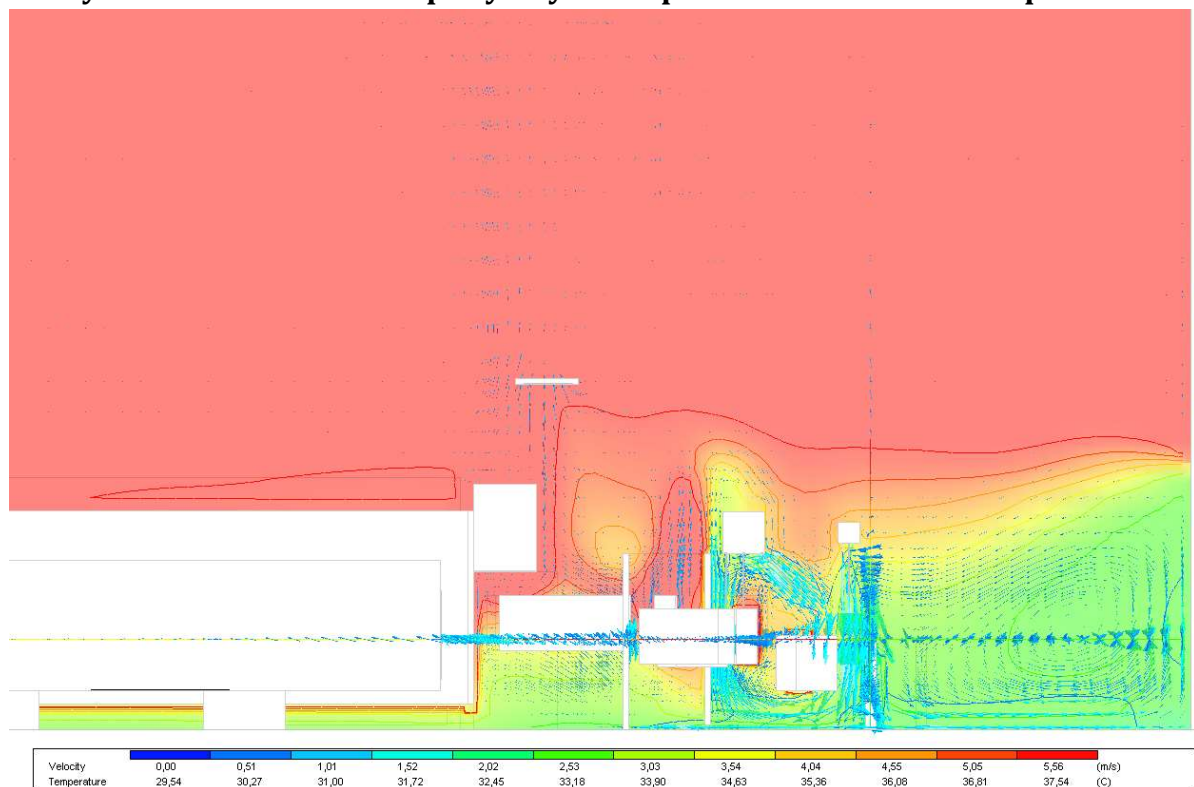
Obrázek 47

Výsledek 6. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



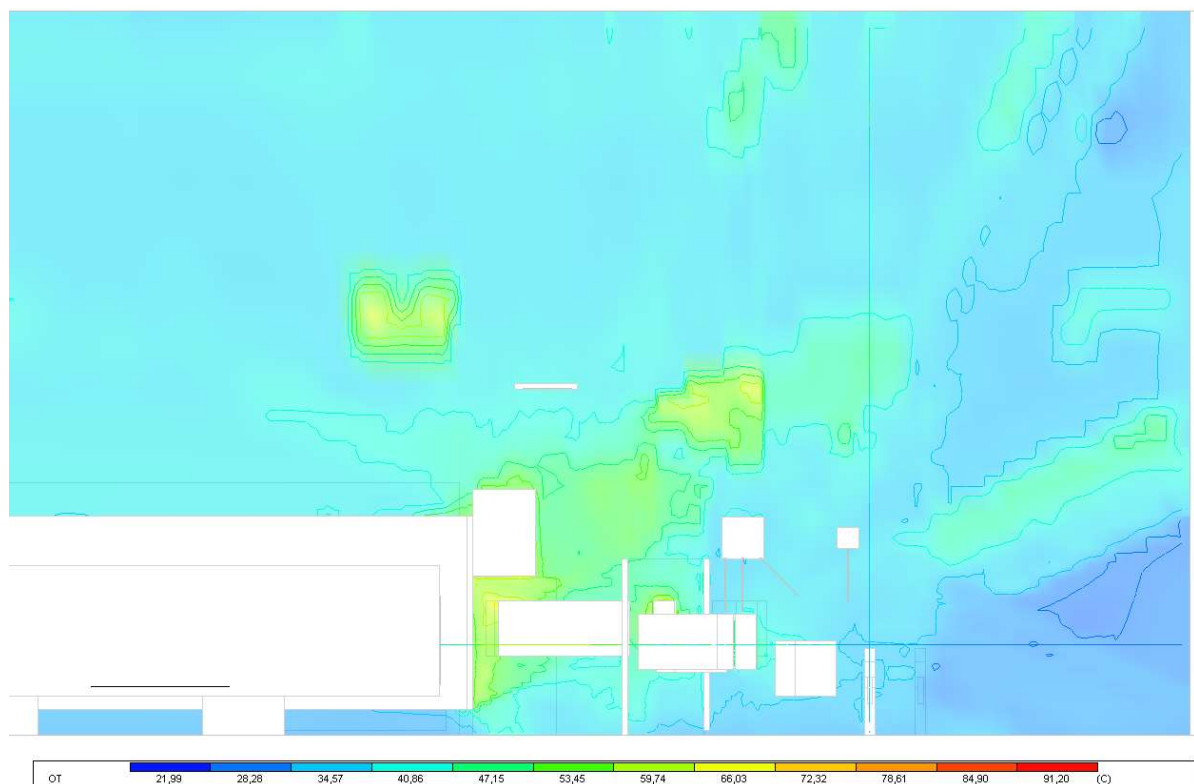
Obrázek 48

Výsledek 6. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 49

Výsledek 6. simulace – operativní teplota boční pohled

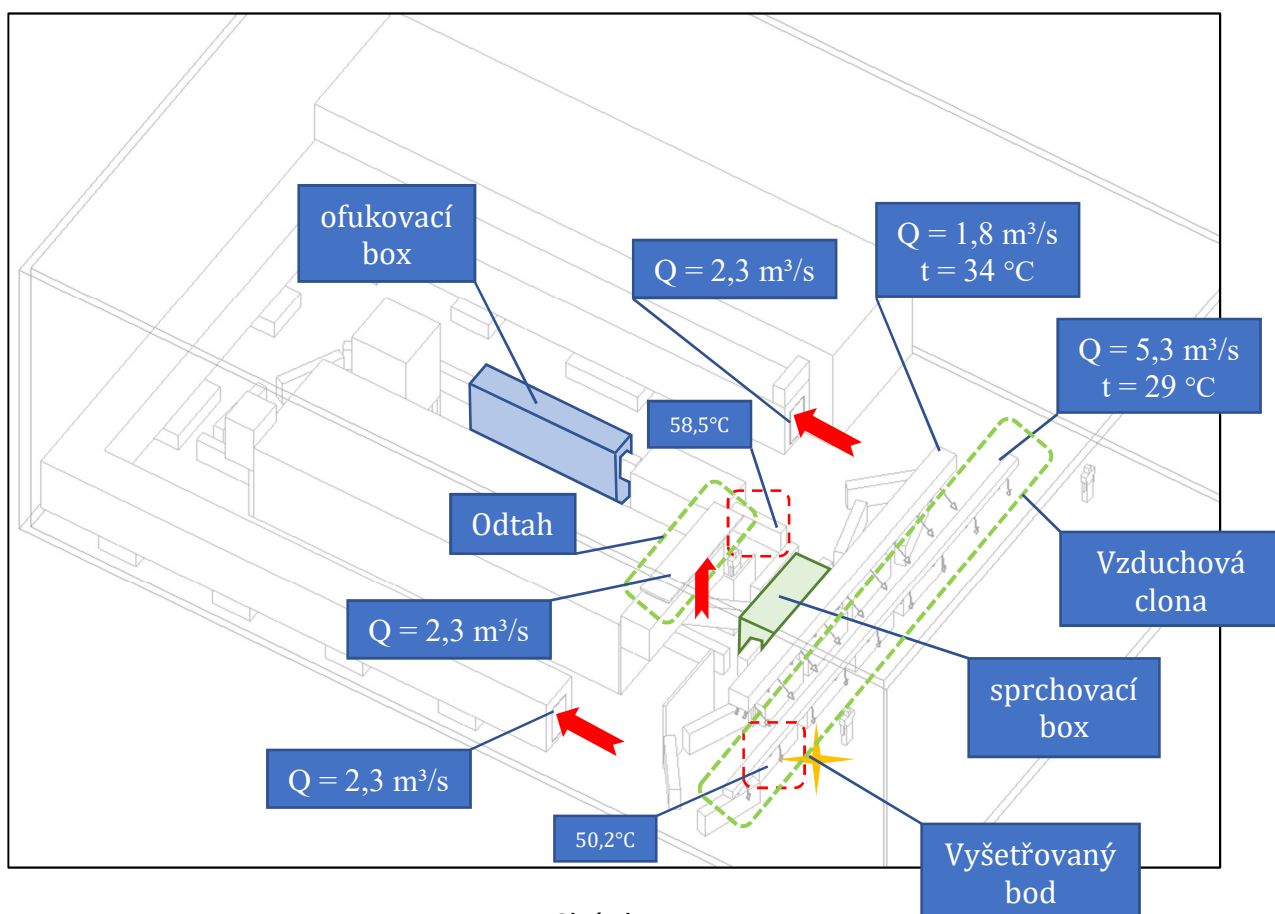


Obrázek 50

B.5.7 Simulace – 7 konvektivní chlazení výrobků a pracovníků + adiabatické chlazení výrobků

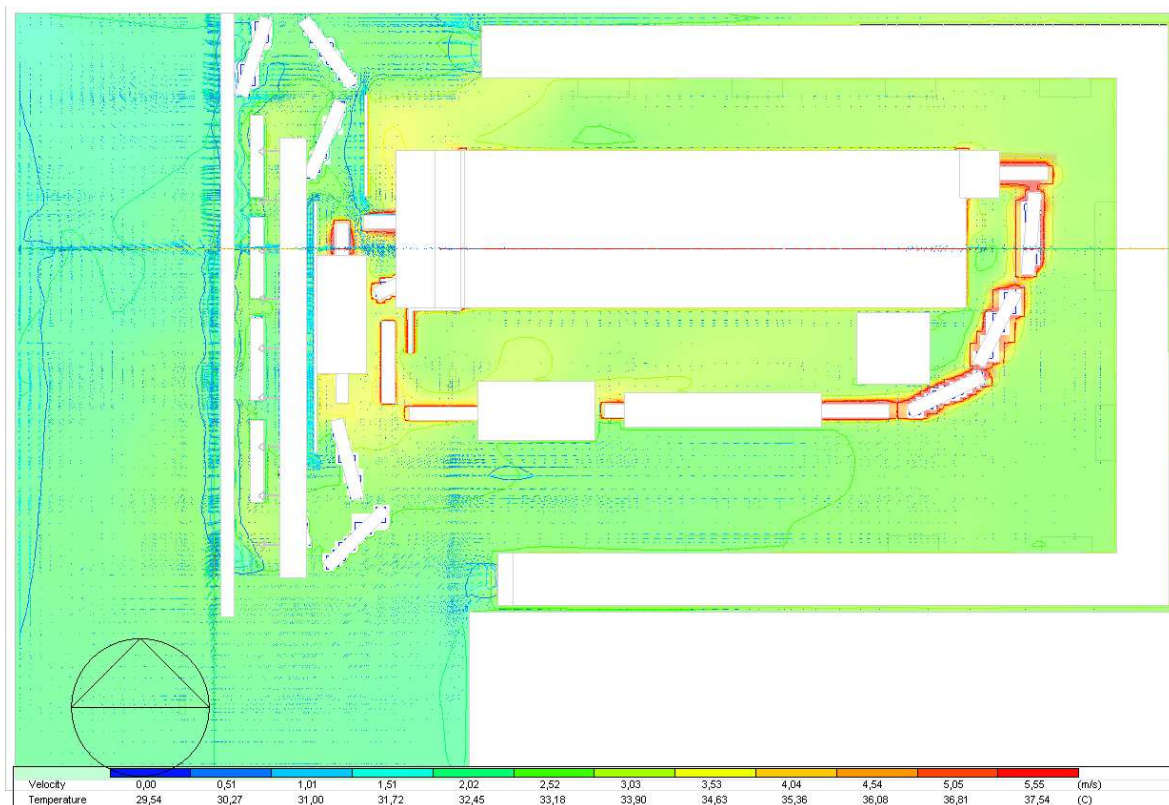
Poslední variantou je aplikace všech opatření pro snížení tepelné zátěže na pracovníky. Kombinuje 6 variantu s adiabatickým chlazením po vypálení výrobků.

přívod vzduchu:	$t_{př}$ [°C]	Q_v [l/s]	$Q_{v\text{výstka}}$
stálé VZT	34	1755	65
přídavné VZT	29	5250	350
odvod vzduchu:			
odtahem nad pecí		2335	2335
chemickou linkou		4670	2335
sálající výrobky:	$t_{zóna1}$ [°C]	$t_{zóna3}$ [°C]	
	31,6	58,5	
chladičí box:	v [m/s]	L [m]	α [W/m²K]
po sušení	6	6	29,13
po vypálení	-	3	228,77



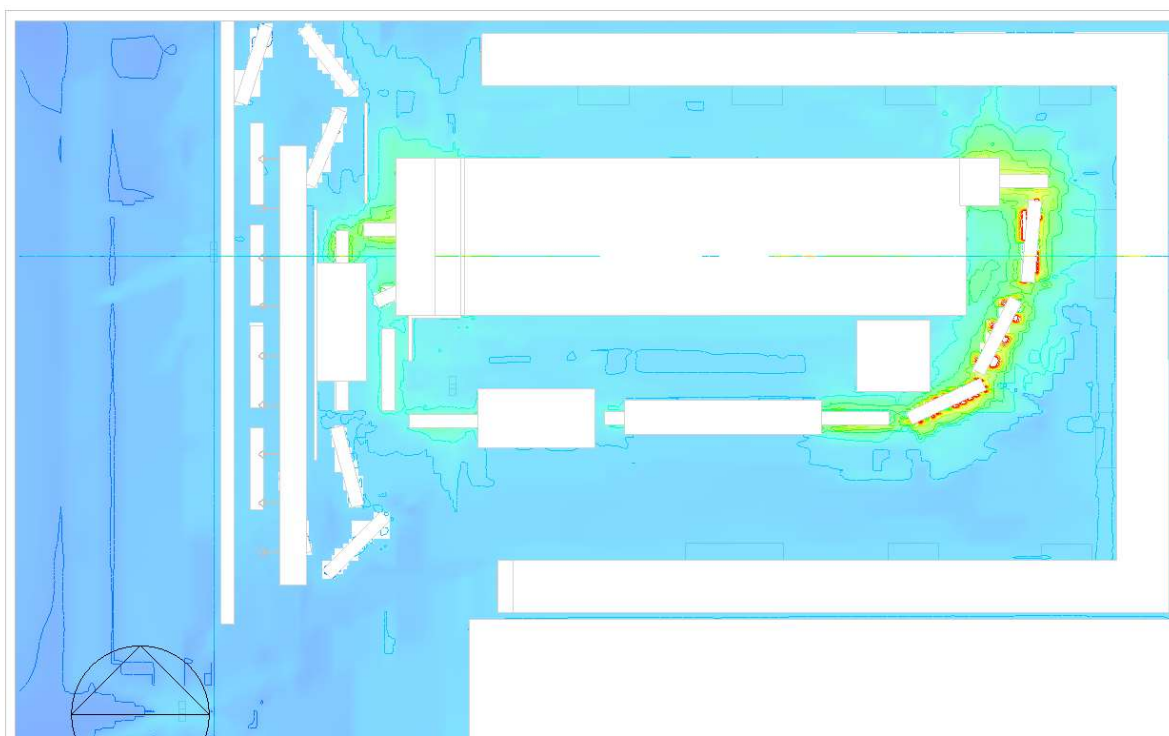
Obrázek 51

Výsledek 7. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu pohled z vrchu



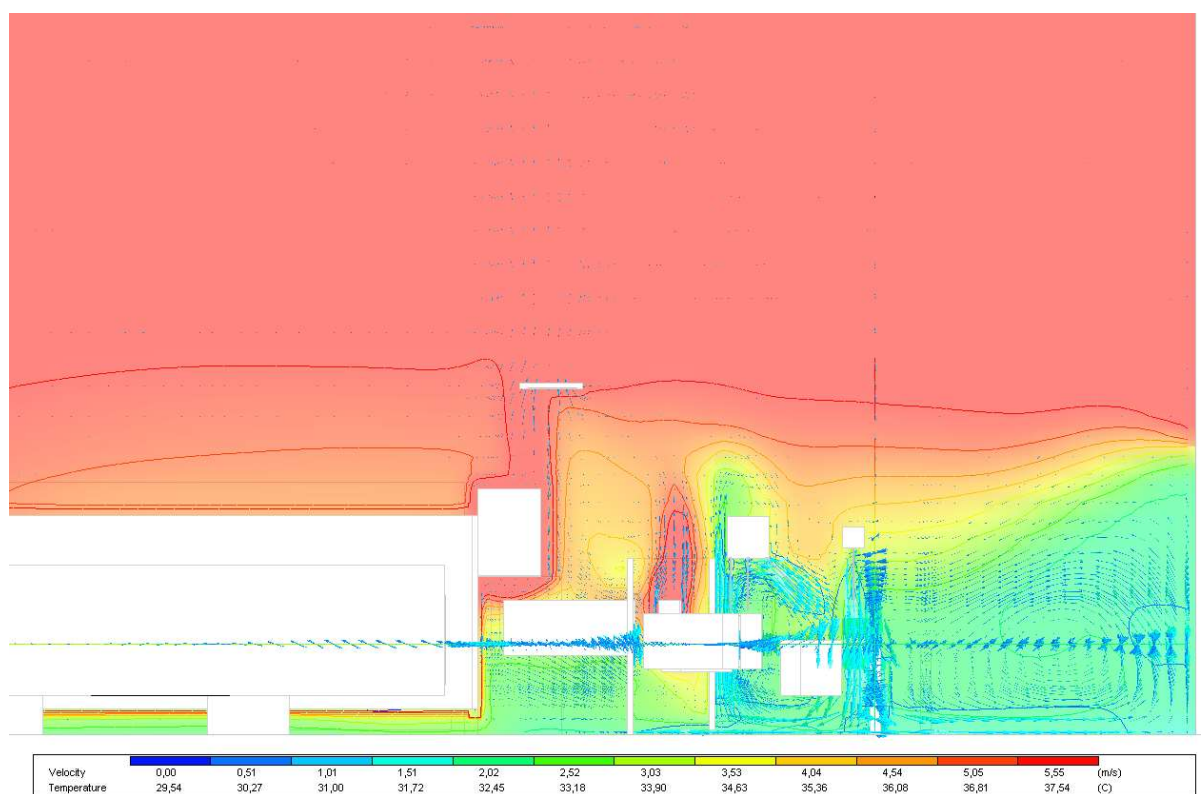
Obrázek 52

Výsledek 7. simulace – operativní teplota pohled z vrchu



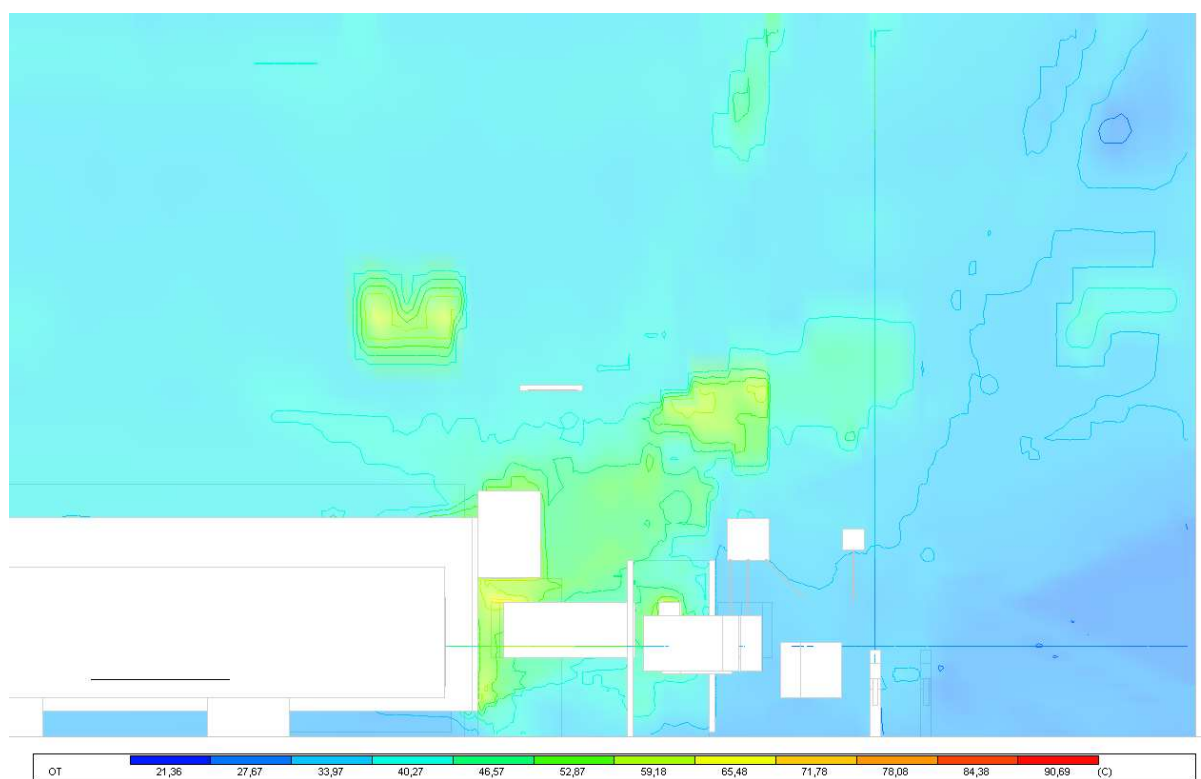
Obrázek 53

Výsledek 7. simulace – teploty a rychlost proudění vzduchu boční pohled



Obrázek 54

Výsledek 7. simulace – operativní teplota boční pohled



Obrázek 55

B.5.8 Výsledky ze simulací.

Export výsledků simulací v datové podobě je možný pro jeden plošný řez výpočetní geometrií. Grafické výstupy, uvedené výše, obsahovaly řezné roviny, které se protínaly v bodě 1 pracovní zóny ve výšce 1,75 m nad podlahou, což je úroveň hlavy – nejcitlivější část těla na teplotu. Pro potřeby výpočtu indexu WBGT jsou hodnoty odečítány z úrovně 1,1 m nad podlahou, což je úroveň břicha pracovníků. Extrahovaný datový soubor s příponou .csv je natolik obsáhlý (22000 řádků), že jsou, pro zjednodušení, výsledky zobrazeny v tabulce, ve třech bodech, pro každou pracovní zónu jeden.

Tabulka shrnující výsledky simulací ve třech místech modelu (zóna u dopravníku, zóna) obsahuje tyto data:

- rychlost proudění vzduchu v [m/s]
- teplotu vzduchu t [°C]
- tlak p [Pa]
- střední radiační teplotu MRT [°C]
- operativní teplotu OT [°C]
- indexy PMV a PPD hodnotící kvalitu prostředí pro komfortní vzduchotechniku. Toto hodnocení je ale pro náš případ prostředí horkého provozu nepoužitelné.

Pro názornost byly do tabulky přidány i některé hodnoty okrajových podmínek pro jednotlivé simulace.

B.6 Výpočet vlhkostních poměrů

Vstupní parametry pro výpočet:

- Stále otevřená vrata do exteriéru umožňují počítat s rovnotlakým systémem větrání.

-Parametry vzduchu v interiéru, naměřené v kritickém období investorem, jsou $t = 30\text{ °C}$, 50% vlhkosti, odtud $x = 13,5\text{ g/kg}$.

-Parametry vzduchu v exteriéru jsou $t = 34\text{ °C}$, $h = \text{kJ/kg}$, odtud $x = 9,2\text{ g/kg}$.

B.6.1 Celková vnitřní produkce vlhkosti

přívod vzduchu:	$Q_v\text{ [m}^3/\text{s]}$	$x\text{ [g/kg]}$	$\rho\text{ [kg/m}^3]$	přivedená vlhkost:	$M = Q_v \cdot p \cdot x$	vnitřní produkce vlhkosti:
stálé VZT	1,755	9,2	1,128		$M = 1,755 \cdot 1,128 \cdot 9,2$	$M_{\text{int}} = 38,09 - 25,65$
přídavné VZT	0,72	9,2	1,128		$M = 0,72 \cdot 1,128 \cdot 9,2$	
odvod vzduchu	2,475	13,5	1,14		$M = 25,685\text{ g/s}$	$M_{\text{int}} = 12,432\text{ g/s}$
				odvedená vlhkost:	$M = 2,475 \cdot 1,14 \cdot 13,5$	
					$M = 38,090\text{ g/s}$	

B.6.2 Měrná vlhkost interiéru v simulacích 2, 3, 4

přívod vzduchu:	$Q_v\text{ [m}^3/\text{s]}$	$x\text{ [g/kg]}$	$\rho\text{ [kg/m}^3]$	přivedená vlhkost:	$M = 5,67 \cdot 1,128 \cdot 9,2$	vnitřní měrná vlhkost:
stálé VZT	3,805	9,2	1,128	vnitřní produkce:	$M = 58,841\text{ g/s}$	$X_{\text{int}} = M_{\text{int}} / (Q_{v\text{př}} \cdot \rho_{\text{př}}) + x_{\text{př}}$ $X_{\text{int}} = 12,4 / (5,67 \cdot 1,13) + 9,2$
přídavné VZT	1,89	9,2	1,128		$M = 12,432\text{ g/s}$	
přívod vzduchu	5,67	9,2	1,128			
odvod vzduchu	5,67	x	x	odvedená vlhkost:		$X_{\text{int}} = 11,144\text{ g/kg}$

B.6.3 Měrná vlhkost interiéru v simulaci 5

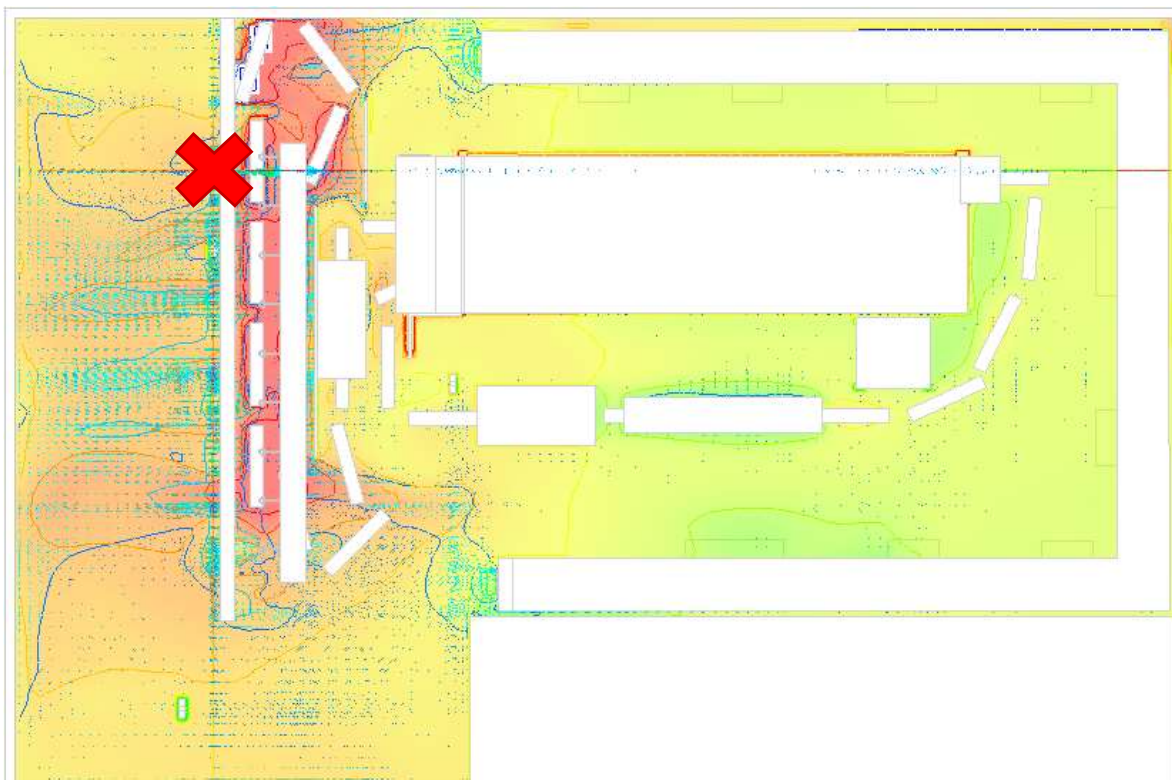
přívod vzduchu:	$Q_v\text{ [m}^3/\text{s]}$	$x\text{ [g/kg]}$	$\rho\text{ [kg/m}^3]$	přivedená vlhkost:	$M = 7,76 \cdot 1,145 \cdot 11,2$	vnitřní měrná vlhkost:
stálé VZT	1,755	11,2	1,145	vnitřní produkce:	$M = 99,450\text{ g/s}$	$X_{\text{int}} = M_{\text{int}} / (Q_{v\text{př}} \cdot \rho_{\text{př}}) + x_{\text{př}}$ $X_{\text{int}} = 12,4 / (7,76 \cdot 1,15) + 11,2$
nové VZT	6	11,2	1,145		$M = 12,432\text{ g/s}$	
přívod vzduchu	7,755	11,2	1,145			
odvod vzduchu	7,755	x	x	odvedená vlhkost:		$X_{\text{int}} = 12,600\text{ g/kg}$

B.6.4 Měrná vlhkost interiéru v simulacích 6, 7

přívod vzduchu:	Qv [m³/s]	x [g/kg]	ρ [kg/m³]	přivedená	M = 7,005.1,141.10,	vnitřní měrná vlhkost:
stálé VZT	1,755	9,2	1,128	vlhkost:	M =85,495 g/s	
nové VZT	5,25	11,2	1,145	vnitřní produkce:	M = 12,432 g/s	$x_{int} = M_{int}/(Q_{vpř} \cdot \rho_{př}) + x_{př}$
přívod vzduchu	7,005	x	x			$x_{int} = 12,4/(7,0 \cdot 1,14) + 10,7$
odvod vzduchu	7,005	x	x	odvedená		$x_{int} = 12,254 \text{ g/kg}$
				vlhkost:		
x směsy přívodu	$x=(Q_{vs} \cdot x_s + Q_{vn} \cdot x_n)/(Q_{vs} + Q_{vn})$			$x=(1,755 \cdot 9,2 + 5,25 \cdot 11,2)/7,005$		$x_{směsy} = 10,699 \text{ g/s}$
ρ směsy přívodu	$\rho=(Q_{vs} \cdot \rho_s + Q_{vn} \cdot \rho_n)/(Q_{vs} + Q_{vn})$			$\rho=(1,755 \cdot 1,128 + 5,25 \cdot 1,145)/7,01$		$\rho_{směsy} = 1,141 \text{ kg/m}^3$

B.7 Výpočet WBGT

WBGT prostředí je počítáno v pracovní zóně 1 u dopravníku, ve vyznačeném bodě na obrázku níže, ve výšce 1,1 m – úrovni břicha pracovníků.



Obrázek 56

Pro výpočet WBGT byl použit tabulkový proces Excel, který pracuje s těmito vstupními parametry: teplotou vzduchu t_a , kulovou teplotu t_g , teplotou rosného bodu t_d , rychlostí proudění vzduchu v .

Stanovení vstupních parametrů:

-teplota vzduchu t_a jako výsledek ze CFD simulace

-kulová teplota t_g jako operativní teplota OT z výsledku CFD simulace

-teplota rosného bodu t_d odečtená z h – x diagramu pro vypočtené měrné vlhkosti při teplotě vzduchu t_a ze simulací

-rychlost proudění vzduchu v jako výsledek ze CFD simulace

Iterační rovnice, pro stanovení předvídané teploty přirozeně mokrého teploměru t_{nw} se kterou tabulkový procesor pracuje je z normy ČSN EN ISO 7243 2018, místo parametru relativní vlhkosti, počítá s teplotou rosného bodu, přičemž normovou rovnici upravuje pro použití této hodnoty.

Rovnice pro výpočet WBGT pro vnitřní prostředí:

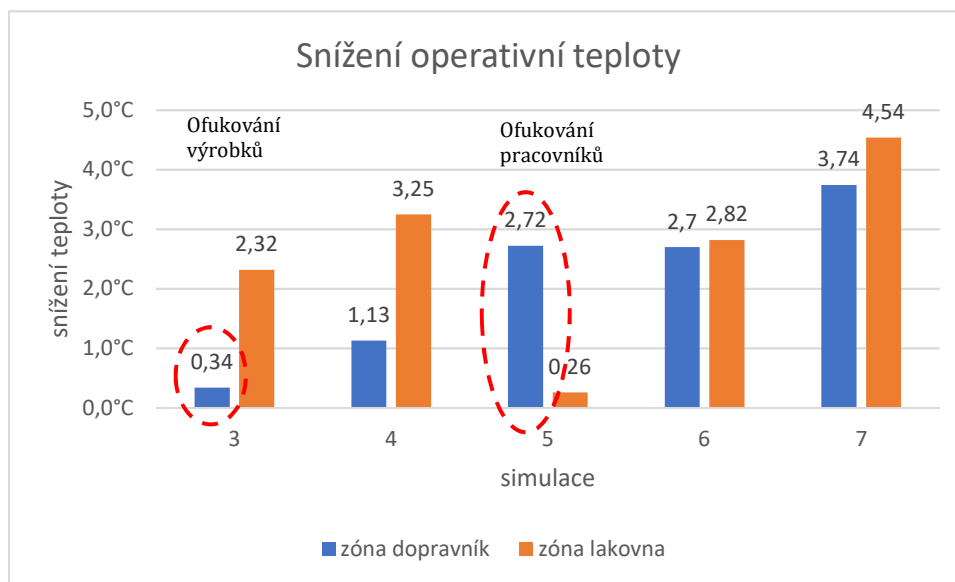
$$WBGT_{int} = 0,67.t_{nw} + 0,33.t_g - \log(v_a).(t_a - t_{nw})$$

Stanovení referenční hodnoty $WBGT_{eff}$ bylo možno dobře stanovit z tabulky v normě ČSN EN ISO 7243 2018 pro odhad produkce metabolického tepla podle fyzické obtížnosti vykonávané práce na pracovišti. Fyzická aktivita zaměstnanců lakovny v zóně 1 přesně odpovídá popisu 2. třídy metabolické produkce– 300 W. Pro tuto třídu je limitní hodnota $WBGT_{eff} = 28\text{ °C}$ pro aklimatizované pracovníky a $WBGT_{eff} = 26\text{ °C}$ pro neaklimatizované pracovníky. CAV nošeného oblečení na pracovišti je roven 0. V tabulce níže jsou hodnocena prostředí navržených stavů podle WBGT. Zelené podbarvení pole značí, že pracovní podmínky splňují požadavky ČSN EN ISO 7243 2018.

simulace	1	2	3	4	5	6	7
t_a	36,7	36,9	36,6	35,8	33,1	33,1	32,5
$t_{g(OT)}$	37,5	37,5	36	33,5	34,8	33,5	30,5
t_d	18,5	15,3	15,3	15,3	17,4	16,9	16,9
v	0,6	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6
WBGT	28,3	27,3	27	26,6	25,9	25,8	25,6
$WBGT_{reff, aklimat}$	28	28	28	28	28	28	28
$WBGT_{reff, neklimat}$	26	26	26	26	26	26	26

B.8 Vyhodnocení simulací

Pro porovnání účinnosti jednotlivých opatření bylo použito snížení operativní teploty v jednotlivých simulacích. 2. simulace je porovnávána s ostatními. Porovnání je provedeno v místě dopravníku a lakovny, v prostorech, kde je třeba snížit tepelnou zátěž.



Obrázek 57

Na první pohled je vidět, že nejlepšího zlepšení pracovních podmínek je dosaženo ve variantě s adiabatickým chlazením, kombinovaným s ofukem pracovníků, dále pak že ofukování pracovníků je až desetkrát účinnější, než ofukování výrobků. Adiabatické chlazení výrobků snižuje tepelnou zátěž plošně napříč celým prostorem, ve variantě 4, kde má ochlazovat prioritně zónu dopravníku, výrazně sníží OT i v místě lakovny.

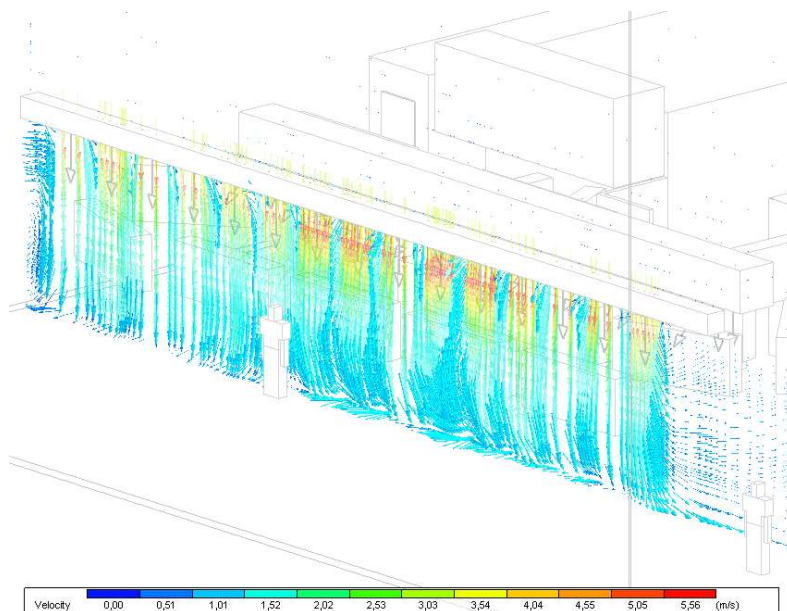
Graf ukazuje, že se přidáním ofukování výrobků k variantě 5 tepelná zátěž skoro neprojeví, což je nanejvýš nevhodné, protože chladicí box výrobků je velmi nákladný a složitý na provedení. Adiabatické chlazení výrobků je extrémně účinné, nicméně spojené s rizikem překročení maximální možné relativní vlhkosti pro technologii lakování a komplikacemi složitého systému rozprašovacích trysek. Pokud vyloučíme adiabatické chlazení a chceme snížit tepelnou zátěž na pracovníky v lakovně, nemáme jinou možnost, než použít ofukování výrobků.

Nejoptimálnější opatření, zohledňující účinnost snížení tepelné zátěže, náročnost provedení a ekonomickou stránku je kombinace varianty 5 a 6.

B.9 Navrhované opatření

Využije se velice efektivního ofukování pracovníků ochlazeným vzduchem v zóně 1 a pro snížení tepelné zátěže na pracovníky v lakovně (zóna 3) se použije chladicí konvektivní box. Jelikož, při uvažované rychlosti vzduchu 6 m/s v chladicím boxu, násobně stoupne rychlost v přívodním a odvodním potrubí, které nemůže mít tak velké průřezy. Stoupá i cena použitých ventilátorů spolu s účinky turbulentního proudění vzduchu (riziko pádu výrobků ze závěsu, velká hlučnost provozu). Proto se rychlost v boxu sníží na polovinu, toto je možné, jelikož tak účinnost ochlazení klesne jen o třetinu. To znamená že výrobky budou do lakovny přijíždět o 22 °C chladnější než v uvažované kritické situaci.

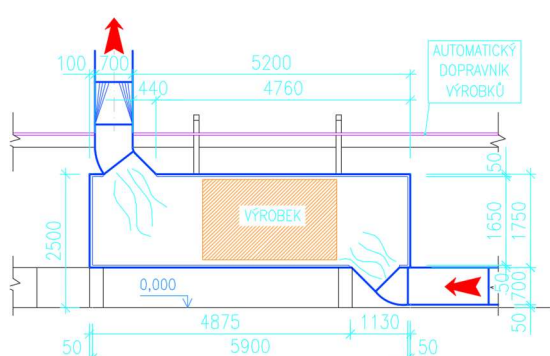
Navrhovaným opatřením je přidání vzduchové clony s adiabaticky ochlazeným vzduchem o 5 °C, s průtokem 5,25 m³/s, podle modelových parametrů, tak aby se obrazec proudění vzduchu podobal co nejvíce simulaci 6.



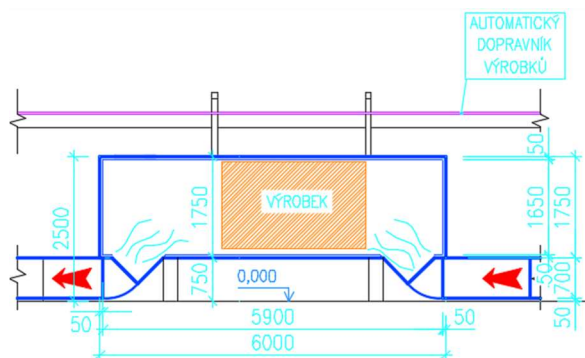
Obrázek 58

V kombinaci s ofukovacím boxem před lakovnou s rychlostí proudění vzduchu 3 m/s. Vzduch v chladicím boxu před lakovnou proudí proti směru pohybu automatického dopravníku, aby případné úniky vzduchových proudů neovlivňovaly prostředí lakovacího boxu.

Přiváděný vzduch do doxu prochází přes dvojitou filtraci pro zajištění čistoty povrchu před nanášením lakovací hmoty v prášku. Přívod a odvod vzduchu v chladičím boxu nemohl být realizován napříč boxem, pro rovnoměrné proudění po výšce boxu, protože by odtahové otvory byly příliš úzké a docházelo by k velikým turbulencím, nedaly se realizovat ani z boku z důvodu nedostatku místa. Na jedné straně. Možnost instalace odvodu jen z jedné strany, by způsobila přisátí projíždějícího výrobku odtahovým proudem a výrobek by spadl. Proto byl ofukovací box navržen tak, že přívod i odvod je umístěn na spodu a proud vcházející vzduchu je směřován pod úhlem 45°, aby se eliminovalo přisátí odvodem.

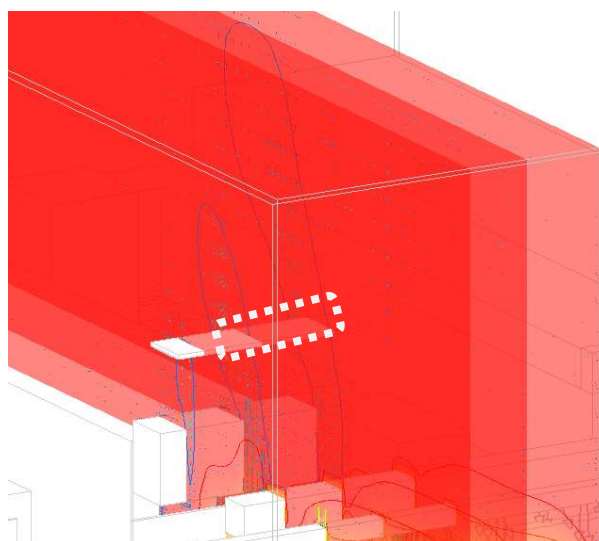


Obrázek 60



Obrázek 59

Nad pecí je instalován odsávací zákryt o průtoku 2,335 m³/s ze simulace, kde odvádí tok teplého toku z před pece detekovaného v simulacích. Proud vzduchu po délce klesá, proto byla digestoř posunuta na pravou stranu pece viz obrázek níže.



Obrázek 61

B.9.1 Dimenzování VZT potrubí

B.9.1.1 Tlakové ztráty při proudění vzduchu

Ztráty třením po délce pro hranaté potrubí:

$$\Delta p_{\text{tr}} = \lambda \cdot \frac{U}{4S} \cdot l \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$$

Ztráty třením po délce pro kruhové potrubí:

$$\Delta p_{\text{tr}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$$

Součinitel tření:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

relativní drsnost stěn při hydraulicky drsných stěnách:

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \geq \frac{30}{Re^{0,875}} \geq \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log e$$

kde k je absolutní drsnost stěn, pro pozinkovanou ocel se k = 0,15 mm

přepočet obdelníkového průřezu na rovnocenný průřez:

$$d_e = \frac{2a \cdot b}{a + b}$$

Ztráty vřazenými odpory:

$$\Delta p_{\xi} = \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$$

Kde ξ je součinitel vřazeného odporu

Celková tlaková ztráta:

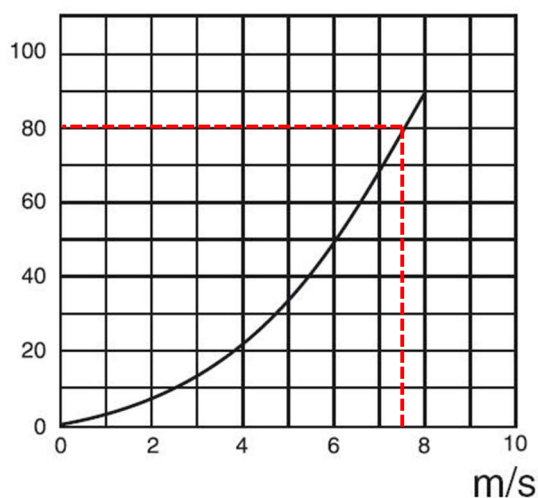
$$\Delta p_z = \Delta p_{\text{tr}} + \Delta p_{\xi} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho$$

**Tabulka tlakových ztrát přírodního a odvodního potrubí chladicího boxu a trasy
pro odsávací zákryt.**

			odvod		přívod		odsávací zákryt	
hustota	kg.m ⁻³	ρ=	1,128	1,128	1,128	1,128	1,14	
dyn. viskozita	Pa.s	η=	1,85E-05	2E-05	1,8E-05	2E-05	1,8E-05	
délka potrubí	m	L=	16,15	3,1	21,6	5	9,9	
průměr potrubí	m	d=	0,8	0,8	0,9	0,8	0,63	
absolutní drsnost	mm	k=	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
průtok	m ³ s ⁻¹	Q=	3,465	3,465	3,465	3,465	2,335	
vřazený odpor		ξ=	1,1	0,6	3,21	6,12	2,2	
kin. viskozita	m ² s ⁻¹	ν=	1,62E-05	2E-05	1,6E-05	2E-05	1,6E-05	
relativní drsnost		ε=	0,47619	0,4762	0,47619	0,4762	0,47619	
rychlost	m.s ⁻¹	v=	6,89	6,89	5,45	6,89	7,49	
Reynoldsovo číslo		Re=	341464	341464	303524	341464	292199	
třecí součinitel		λ=	0,3151	0,3151	0,3151	0,3151	0,3151	
tlaková ztráta	Pa	p _{zi} =	199,96	48,80	180,24	216,80	228,73	
tlaková ztráta p =			248,76 Pa		397,04 Pa		228,73 Pa	

Tlakové ztráty TWG 710 protidešťová žaluzie:

Pa



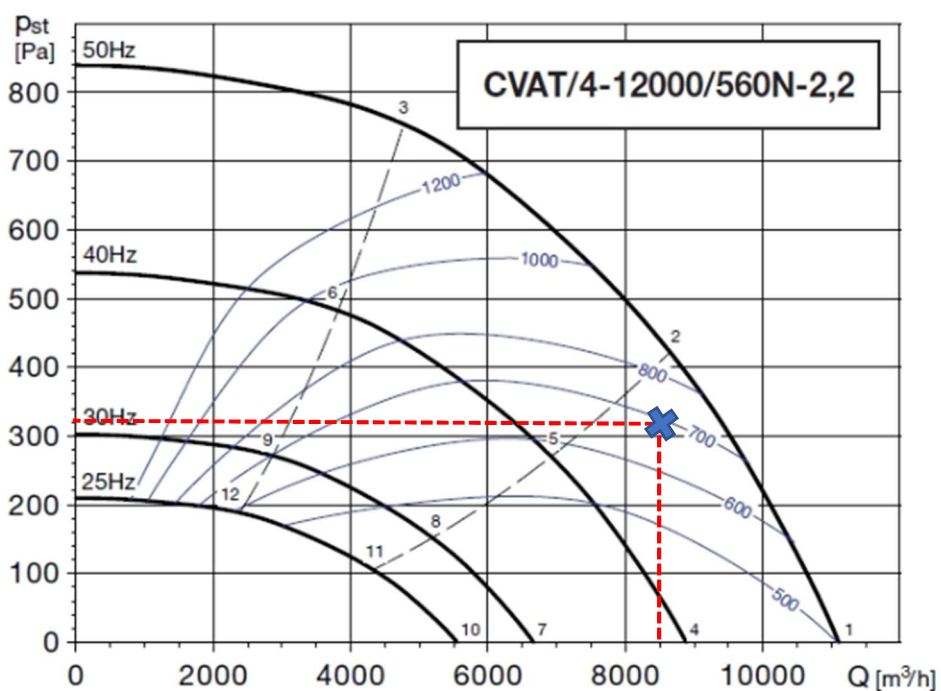
Obrázek 62

B.9.1.2 Návrh ventilátorů

Z vypočtených tlakových ztrát a z potřeby průtoků byly navrženy ventilátory a jejich pracovní body.

Ventilátor pro VZT potrubí digestoře nad pecí: CVAT/4-12000/560N-2,2 tichý radiální ventilátor

-tlaková ztráta $p = 308 \text{ Pa}$; průtok vzduchu $Q_v = 8406 \text{ m}^3/\text{s}$



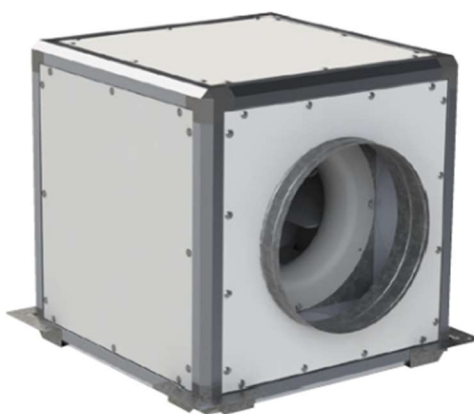
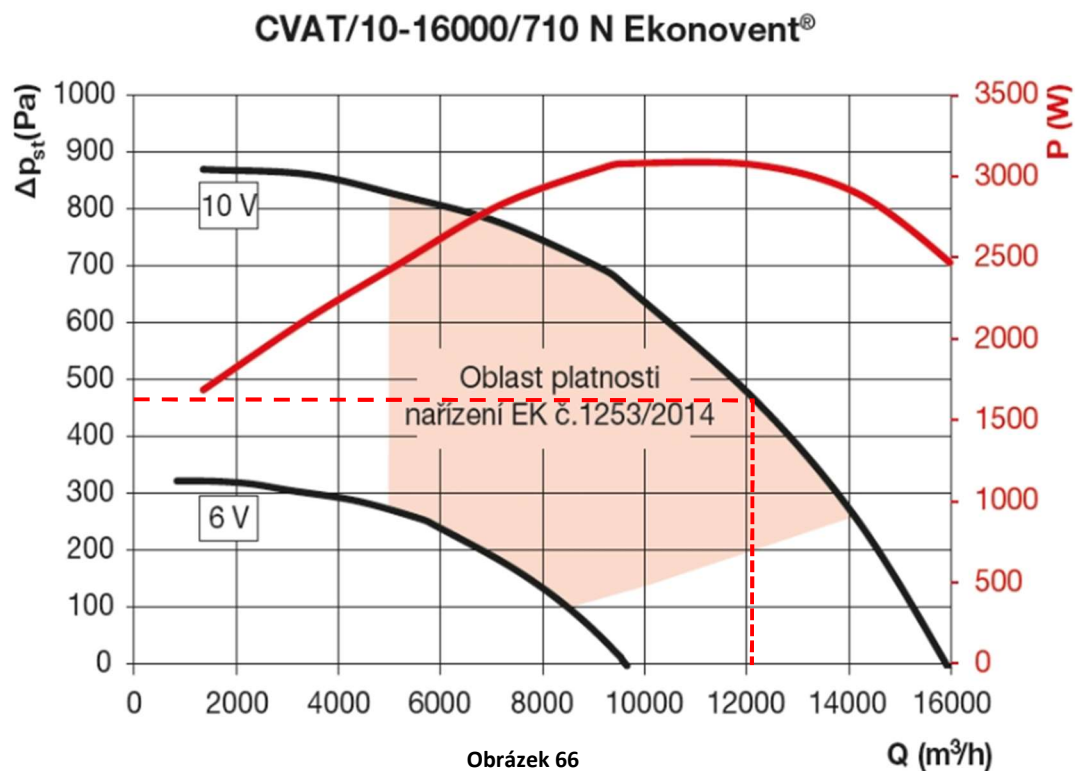
Obrázek 64



Obrázek 63

Ventilátor pro přívod do chladicího boxu: CVAT/ 10-16000/710 N Ekonovent tichý radiální ventilátor

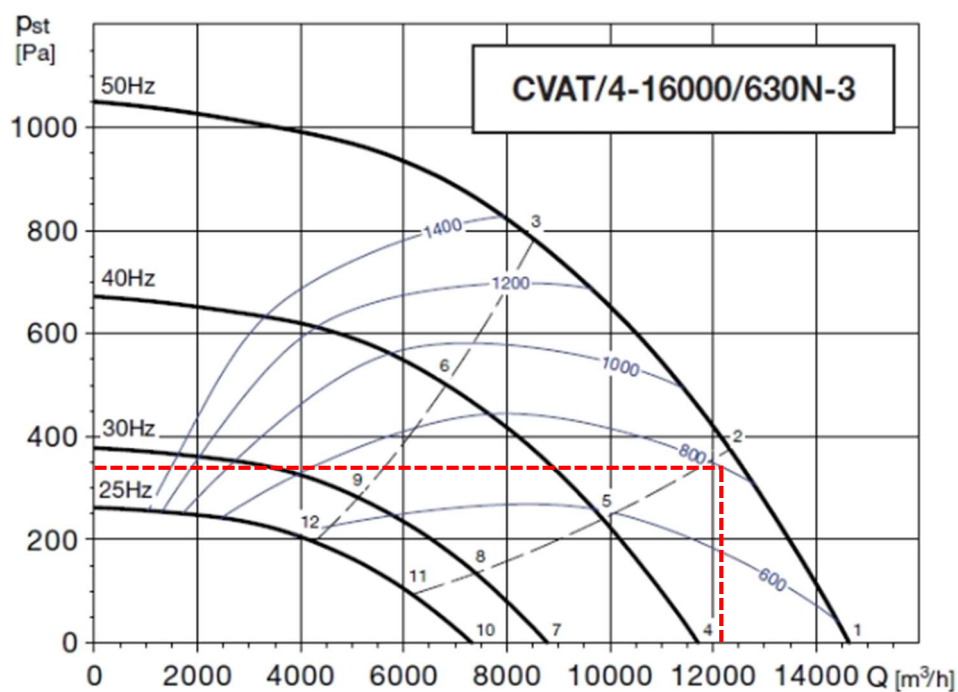
-tlaková ztráta $p = 477 \text{ Pa}$; průtok vzduchu $Q_v = 12174 \text{ m}^3/\text{s}$



Obrázek 65

Ventilátor pro odvod z chladicího boxu: CVAT/ 4-16000/630N-3 tichý radiální ventilátor

-tlaková ztráta $p = 329 \text{ Pa}$; průtok vzduchu $Q_v = 12174 \text{ m}^3/\text{s}$



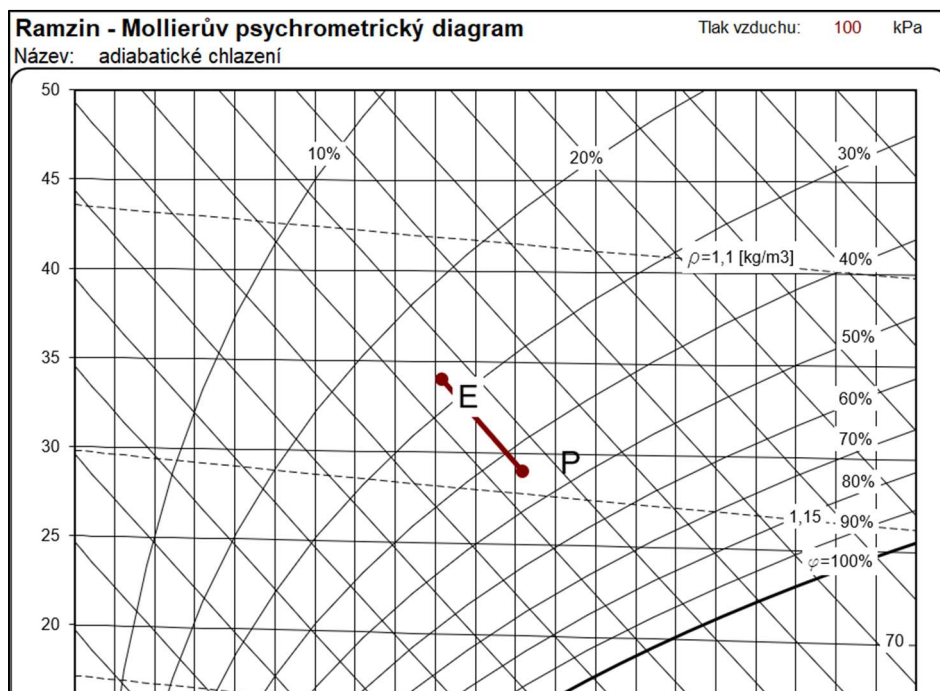
Obrázek 68



Obrázek 67

B.9.1.1 Návrh adiabatického chladiče

Navrhuji venkovní chladicí zařízení COOLSTREAM S, společnosti COLT. Zařízení obsahuje ventilátory, filtry a desorpční medium, které systém zvlhčuje vodou. Voda se odpaří, a tak vzduchu odebere teplo.

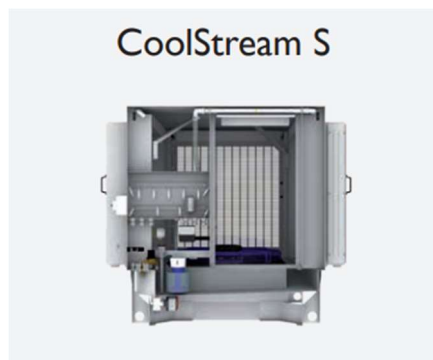


Na obrázku h - x diagramu je úprava vzduchu, která se po zařízení požaduje a to ochlazení vzduchu z exteriéru o 5 °C při průtoku vzduchu 18900 (5,25 m³/s) a tlakové ztrátě distribuční sítě 510 Pa.

Úprava vzduchu požaduje výkon:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_e - t_i) = (\rho_i - \rho_e) \cdot Q_v \cdot c \cdot (t_e - t_i) = (1,145 - 1,128) \cdot 5,25 \cdot 4186 \cdot (34 - 29) = 1868 \text{ W}$$

Zařízení bude mít 2 radiální ventilátory, každý překoná ztrátu 400 Pa, při maximálním průtoku vzduchu $Q_v = 22500 \text{ m}^3/\text{s}$.



Obrázek 69



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

C.PROJEKT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Sliva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ ŠIKULA, Ph.D.

BRNO 2019

TECHNICKÁ ZPRÁVA

C.1 Tabulky

Tabulka místností

místnost	číslo
lakovna	1
pracovní zázemí	2

Tabulka zařízení

zařízení	číslo
ventilátor CVAT/4-12000/560N-2,2	1
ventilátor CVAT/ 10-16000/710 N Ekon.	2
ventilátor CVAT/ 4-16000/630N-3	3
systém větrání a chlazení Cool Stream S	4
odsávací zákryt	5
ofukovací box	6
vzduchová sprcha	7

C.1.1 Technická specifikace

CVAT/10-16000/710 N Ekonovent tichý radiální ventilátor

-Rozměry	DN 710 mm; v,š,d 1100x1100x1100 mm
-Max. otáčky	1244/min
-Výkon	3078 W
-Napájecí napětí	3x400 V/50 Hz
-Proud	4,8 A
-Max. průt. vzduchu	15900 m ³ /s
-Hmotnost	190,4 kg
-Regulace otáček	EC motor s plynulým řízením otáček pomocí signálu 0...10 V

CVAT/4-12000/560N-2,2 tichý radiální ventilátor

-Rozměry	DN 560 mm; v,š,d 900x900x900 mm
-Max. otáčky	1470/min
-Max. výkon	2093 W
-Max proud	7,3/4,2 A
-Max. průt. vzduchu	11100 m ³ /s
-Hmotnost	82 kg
-Regulace otáček	VFVN – 020 -3L -6 -PTC

CVAT/4-12000/560N-2,2 tichý radiální ventilátor

-Rozměry	DN 630 mm; v,š,d 1000x1000x1000 mm
-Max. otáčky	1460/min
-Max. výkon	3234 W
-Max proud	10,3/5,9 A
-Max. průt. vzduchu	14640 m ³ /s
-Hmotnost	113 kg
-Regulace otáček	VFVN – 020 -3L -8 -PTC m ³ /s

Systém větrání a chlazení COOL Stream S

- Max. průt. Vzduchu 22500 m³/s
- Chladicí výkon při 35 °C, 30 % rel. vlhkosti, 1013 hPa 44 – 108 kW

- Odtok integrovaný vypouštěcí ventil s vratnou pružinou (s bezpečnostní funkcí)
- Přítok1 – 10 l/min. špičkový odběr, 20 l/min přerušovaný
- solenoidový ventil s vnějším závitem 3/4"
- Jednostupňová filtrace sadou rámečkových filtrů
- Jmenovitý výkon 8,5 kW
- Napájení 3 x 400 V/50 Hz
- Rozměry v,š,d 1435x1435x1155 mm
- Hmotnost 300 kg

C.1.2 Použité normy a vyhlášky

Vyhláška MMRČR č.499/2009 Sb. o dokumentaci staveb

ČSN EN 15 665 – Větrání budov

ČSN EN ISO 7243 2018 Ergonomie tepelného prostředí – Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru)

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout chlazení v práškové lakovně. V teoretické části jsem podrobně představil normu pro hodnocení prostředí horkých provozů podle ukazatele WBGT.

Ke stanovení tepelně vlhkostních poměrů na pracovišti jsem používal CFD modelace v programu Design builder. Abych mohl vytvořit 3D výpočetní model s povrchovými teplotami a průtokovými poměry vzduchu uvnitř výrobní linky, navštívil jsem třikrát lakovnu. Zmonitoroval jsem prostory haly a výrobní technologie, nasnímal povrchy technologie a výrobků termokamerou. Nashromážděná data nestačila pro stanovení okrajových podmínek do simulací, tak jsem chladnutí výrobků po dráze dopravníku odhadoval pomocí výpočtu, to se mi hodilo i pro demonstraci účinku ofukování výrobků vzduchem a sprchováním vodou pro adiabatické chlazení. Důvěryhodnost těchto výpočtů jsem si ověřil, při výpočtu chladnutí výrobku jedoucího do lakovacího boxu. Po dráze jsem měřil teplotu jeho povrchu, jejíž hodnoty věrně odpovídaly výsledkům výpočtu. Při práci s Design builderem jsem zjistil, že program využívá pouze jedno jádro procesoru, a tak se nehodí pro simulování větších modelů. Při porovnávání účinnosti chladicích opatření bezkonkurenčně zvítězilo adiabatické chlazení výrobků, které snížilo teplotu napříč celým prostředím haly. Jako nejefektivnější se ukázalo ofukování pracovníků vzduchovou sprchou. Oproti adiabatickému chlazení výrobků není tak náročná na realizaci a její účinek pro zlepšení pracovních podmínek je značný. Při hodnocení prostředí jednotlivých variant podle WBGT by maximálním referenčním hodnotám pro aklimatizované pracovníky vyhovělo každé ze simulovaných opatření, nicméně tento index zaručuje pouze podmínky, při kterých pracovníci nebudou trpět na následky tepelné zátěže. Pro citelné zlepšení komfortu na pracovišti je potřeba dalšího snížení tepelné zátěže. Na základě těchto a dalších poznatků jsem se rozhodl pro realizaci následujících opatření: instalaci adiabaticky chlazené vzduchové clony do pracovní zóny u automatického dopravníku, vřazení ofukovacího boxu do dráhy výrobků před lakovacím boxem a umístění odsávacího zákrytu nad čelo pece, odkud vyjíždí horké výrobky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ASHRAE Fundamental Handbook
2. doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D., přednášky z Termomechaniky
3. Fluke Ti45 (Discontinued). *Electronic Test and Measurement Equipment* [online]. Copyright © 2018 SJ Electronics. All Rights Reserved. [cit. 24.05.2019]. Dostupné z: <https://www.sjelectronics.co.uk/fluke-ti45-discontinued>
4. Robot Check. *Robot Check* [online]. Copyright © 1996 [cit. 24.05.2019]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/FLIR-Compact-Resolution-Discontinued-Manufacturer/dp/B00FWGV9X4>
5. Ahlborn - Termoanemometrické čidlo AHLBORN ALMEMO FVA935TH5. *Ahlborn - Úvod* [online]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/termoanemometricke-cidlo-ahlborn-almemo-fva935th5.html>
6. Ahlborn - Teplotní čidlo - dotykové AHLBORN ALMEMO FTA109PH přímé. *Ahlborn - Úvod* [online]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/teplotni-cidlo-dotykovke-ahlborn-almemo-fta109ph-prime.html>
7. Ahlborn - Anemometr - AHLBORN ALMEMO 2590-2A se sondou. *Ahlborn - Úvod* [online]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/pristroje/anemometry/anemometr-ahlborn-almemo-2590-2a-se-sondou.html>
8. *Chlazení adiabatické, průmyslová klimatizace - Colt CZ* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2019]. Dostupné z: <https://www.colinfo.cz/files/pdf/ke-stazeni-technika-prostredi/CoolStream-STAR-brozura.pdf>

Dalším zdrojem pro vypracování práce byly normy uvedené v technické zprávě (odstavec C.1.2 Použité normy a vyhlášky).

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Definice
WBGT	[°C]	Teplota mokrého a kulového teploměru
t_{nw}	[°C]	Mokrý teplota vzduchu přirozeně proudícího přes čidlo
t_g	[°C]	Teplota kulového teploměru
t_a	[°C]	Redukovaná teplota vzduchu s vlivem proudění vzduchu
WBGT _{eff}	[°C]	Efektivní teplota mokrého a kulového teploměru
CAV	[-]	Upravující součinitel oblečení
t	[°C]	Ustálená teplota černého kulového senzoru
g	[-]	Koeficient odezvy záření
t_r	[°C]	Střední radiační teplota
v_a	[m/s]	Rychlost proudění vzduchu
d	[m]	Průměr senzoru
s	[m]	Tloušťka plechu
α	[W/m ² K]	Součinitel přestupu tepla
λ	[W/mK]	Tepelná vodivost materiálu
τ	[s]	Čas chladnutí
c	[J/kgK]	Měrná tepelná kapacita materiálu
ρ	[kg/m ³]	Hustota materiálu
K	[-]	Geometrický součinitel
G	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
ρ_v	[kg/m ³]	Hustota syté páry
ρ_l	[kg/m ³]	Hustota syté kapaliny
h_{fg}	[kJ/kg]	Latentní teplo pro výpar
k_v	[W/mK]	Tepelná vodivost páry
t_{sat}	[K]	Teplota nasycení
t_w	[K]	Teplota vody
μ_v	[m ² /s]	Viskozita syté páry
σ_t	[N/m]	Povrchové napětí
Φ_t	[-]	Martinelliho parametr
Q_v	[l/s]	Hmotnostní průtok vzduchu
$Q_{vvýustka}$	[l/s]	Hmotnostní průtok vzduchu výustky
$t_{př}$	[°C]	Teplota přiváděného vzduchu
L	[m]	Rozměry chladičového boxu
p	[Pa]	tlak vzduchu
MRT	[°C]	Střední radiační teplota
OT	[°C]	Operativní teplotu
x	[g/kg]	Měrná vlhkost vzduchu
h	[kJ/kg]	Entalpie
M	[g/s]	Vlhkostní průtok

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	21
Obrázek 2	33
Obrázek 3	34
Obrázek 4	34
Obrázek 5	34
Obrázek 6	34
Obrázek 7	34
Obrázek 8	35
Obrázek 9	35
Obrázek 10	36
Obrázek 11	36
Obrázek 12	37
Obrázek 13	40
Obrázek 14	40
Obrázek 15	40
Obrázek 16	41
Obrázek 17	41
Obrázek 18	42
Obrázek 19	45
Obrázek 20	47
Obrázek 21	48
Obrázek 22	49
Obrázek 23	49
Obrázek 24	50
Obrázek 25	50
Obrázek 26	51
Obrázek 27	52
Obrázek 28	52
Obrázek 29	53
Obrázek 30	53
Obrázek 31	54
Obrázek 32	55
Obrázek 33	55
Obrázek 34	56
Obrázek 35	56
Obrázek 36	58
Obrázek 37	59
Obrázek 38	59
Obrázek 39	60
Obrázek 40	60
Obrázek 41	61
Obrázek 42	62
Obrázek 43	62
Obrázek 44	63
Obrázek 45	63
Obrázek 46	64
Obrázek 47	65
Obrázek 48	65
Obrázek 49	66

Obrázek 50	66
Obrázek 51	67
Obrázek 52	68
Obrázek 53	68
Obrázek 54	69
Obrázek 55	69
Obrázek 56	73
Obrázek 57	75
Obrázek 58	76
Obrázek 59	77
Obrázek 60	77
Obrázek 61	77
Obrázek 62	80
Obrázek 63	81
Obrázek 64	81
Obrázek 65	82
Obrázek 66	82
Obrázek 67	83
Obrázek 68	83
Obrázek 69	84

SEZNAM PŘÍLOH

VÝKRESY

Výkres č. 1 – Půdorys – Technologie výroby	M 1:50
Výkres č. 2 – VZT stávající stav	M 1:50
Výkres č. 3 – Půdorys VZT navrhované opatření	M 1:50
Výkres č. 4 – Svislé řezy VZT navrhované opatření	M 1:50